

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica



**ANÁLISIS TENSIONAL DE PANELES DE VIDRIO EN
TORNO AL ANCLAJE PUNTUAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Jonathan Fernández Navarrete

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Máster Universitario en:
Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS TENSIONAL DE PANELES DE VIDRIO EN TORNO AL
ANCLAJE PUNTUAL

Autor
Jonathan Fernández Navarrete

Director/a o Directores/as
Mariano González Cortina

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2011

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN GENERAL:	4
1.1. AGRADECIMIENTOS	4
1.2. BASES DE PARTIDA	4
1.3. RESUMEN POR CAPÍTULOS:	5
1.4. ABSTRACT:	7
2. OBJETIVOS DE TRABAJO	8
2.1. OBJETIVOS GENERALES	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. ESTADO DEL ARTE	9
3.1. ANTECEDENTES GENERALES	9
3.1.1. Breve introducción a la evolución de las envolventes de vidrio	9
3.1.2. El vidrio	11
3.1.2.1. Composición del vidrio y principales propiedades físicas:	11
3.1.2.2. Propiedades mecánicas del vidrio	12
3.1.2.3. Tipos de vidrio	15
3.1.2.3.1. Vidrio recocido (annealed glass)	15
3.1.2.3.2. Vidrio termoendurecido	15
3.1.2.3.3. Vidrio templado	15
3.1.2.3.4. Vidrio laminado	16
3.1.2.3.5. Resumen:	17
3.1.2.4. Distribución de tensiones:	18
3.1.2.4.1. Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio:	18
3.1.2.4.2. Predicción tensional del vidrio:	20
3.1.2.4.3. Distribución de las tensiones en un panel de propiedades isotrópicas con un hueco circular:	22
3.1.2.4.4. Influencia de la excentricidad en la distribución de las tensiones al aplicar una carga	27
3.2. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS	29

3.2.1.	Tipos de anclajes puntuales en vidrio laminado	29
3.2.1.1.	Anclajes pasantes con pernos	29
3.2.1.1.1.	Pernos (countersunk fixing).....	30
3.2.1.1.2.	Perno anclado a una sola lámina de cristal del panel de vidrio laminado	30
3.2.1.1.3.	Anclaje de disco (disk fixing)	31
3.2.1.2.	Tipo pinza (clamped).....	31
3.2.1.3.	Anclaje químico: Disco con anclaje químico (bonded disk fixing).....	32
3.2.2.	Juntas elásticas entre el perno y el vidrio:	33
3.2.3.	Tolerancias	35
3.2.4.	Introducción al método de cálculo mediante elementos finitos FEM (Finite Element Method):.....	36
3.2.4.1.	Introducción:.....	36
3.2.4.2.	Conceptos básicos sobre FEM (Finite Element Method):	37
3.2.4.2.1.	Construcción de la geometría:.....	37
3.2.4.2.2.	Mallado:.....	38
3.2.4.2.3.	Restricciones:.....	40
3.2.4.2.4.	Propiedades de los materiales:	40
3.2.4.2.5.	Hipótesis de carga:.....	41
3.2.4.3.	Pasos a seguir en la simulación de paneles de vidrio con anclajes puntuales utilizando el programa SJ-Mepla (http://www.mepla.eu/en/).....	41
3.2.4.4.	Criterios de diseño en la simulación de paneles de vidrio con anclajes puntuales utilizando el programa Straus7:	48
4.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS A SEGUIR	51
5.	ESTUDIO POR AUTORES.....	52
5.1.	Estudio por autores sobre la Fisuración:	52
5.1.1.	Mecánica de fractura lineal elástica. Criterio de Griffith:.....	52
5.1.2.	Modos de sollicitación. Criterio de Irwin de la Intensidad de Tensiones. Tenacidad a la fractura.....	53
5.1.3.	Criterio de fractura según el Eurocódigo:	55
6.	ESTUDIO POR TÉCNICAS EMPLEADAS	56

6.1. Diseño de anclajes puntuales en vidrio laminado mediante el coeficiente de concentración de tensiones (DESIGNING BOLT FIXED LAMINATED GLASS WITH STRESS CONCENTRATION FACTORS).....	56
6.2. Diseño de las perforaciones en vidrio estructural (DESIGN GLASS HOLES FOR BEARING)	57
6.3. Influencia de la forma del perno y la junta elástica en la distribución de tensiones:.....	61
7. ESTUDIO COMPARADO	65
7.1. Introducción.....	65
7.2. Características y parámetros comunes a las tres simulaciones realizadas en Straus7.	65
7.3. Barandilla	67
7.3.1. Características.....	67
7.3.2. Simulación de la barandilla de 2 pernos:	74
7.3.2.1. Simulación de la barandilla de 2 pernos con ClearSight:	74
7.3.2.2. Simulación de la barandilla de 2 pernos con Straus7:	76
7.3.2.3. Simulación de barandilla de 4 pernos con Straus7:	78
7.4. Fachada:	83
7.4.1. Características:.....	83
7.4.2. Simulación del panel para fachada con ClearSight:	83
7.4.3. Simulación de la fachada anterior con Straus7:.....	85
7.5. Simulación de paneles cuadrados de vidrio con hueco central, sometidos a tracción:	91
8. CONCLUSIONES	99
9. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	102
10. NORMATIVA ESPECÍFICA.....	104
11. BIBLIOGRAFÍA.....	106
12. GLOSARIO DE TÉRMINOS	115

1. INTRODUCCIÓN GENERAL:

1.1. AGRADECIMIENTOS

Para comenzar este trabajo de investigación quisiera agradecer la colaboración e interés de las personas que han contribuido y colaborado activamente en la realización del mismo.

Me gustaría agradecer especialmente a Mariano González Cortina, Catedrático de Materiales en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, la atenta dirección de este Trabajo de Fin de Master como tutor, por su ayuda, interés y motivación.

Gracias a Jaime Santa Cruz Astorqui, profesor de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, especializado en programas de simulación FEM, por cuya asignatura relacionada con el programa de simulación Straus7, ha sido posible el enriquecimiento de este trabajo incluyendo un apartado (apartado 7) de investigación con simulaciones propias.

Finalmente me gustaría dar las gracias a mi familia por su apoyo y motivación.

1.2. BASES DE PARTIDA

El crecimiento de la investigación de los acristalamientos se ha visto incentivado en los últimos años como respuesta a una antigua exigencia arquitectónica, como es el de conseguir una mayor transparencia en los edificios. En cada época la arquitectura de los acristalamientos ha evolucionado hasta donde la técnica lo ha permitido.

Hoy en día el concepto del vidrio estructural ha propiciado la existencia de una amplia variedad de posibilidades en el diseño de paramentos y superficies acristaladas. La consideración de este material como parte de una nueva tipología estructural ha fomentado la participación de ingenieros en su investigación y desarrollo, creando nuevas soluciones constructivas imposibles de imaginar años atrás.

Para la realización de esta investigación se ha partido del interés académico de estudiar el comportamiento estructural de paneles de vidrio en torno a las perforaciones practicadas en el mismo para atravesar los pernos pasantes de sujeción.

El estudio se centra principalmente en la distribución de las tensiones alrededor de dicho hueco, por tanto toda mención a la tipología de pernos, juntas

elásticas, tipos de vidrio, etc. es de carácter complementario y su desarrollo es el necesario para la adecuada comprensión del tema a tratar.

Para el ensayo y simulación del comportamiento tensional del vidrio alrededor del hueco se ha empleado un programa de cálculo por elementos finitos (FEM). En la práctica real es común realizar ensayos en laboratorio una vez se han obtenido los resultados esperados en la simulación, por tanto no se descarta la posibilidad de realizar ensayos de esta categoría en futuras investigaciones.

Para obtener el máximo partido en el análisis de las simulaciones [apartado 7] se ha estudiado la metodología que han empleado diferentes investigadores en relación a los posibles parámetros a estudiar [apartado 6]. Son numerosos los parámetros que influyen en la distribución de tensiones en torno a un hueco en un panel de vidrio, sin embargo solo varios son realmente representativos y son estos los que se han utilizado en la investigación.

1.3. RESUMEN POR CAPÍTULOS:

Capítulo 3:

El capítulo 3 abarca el estado del arte. En el apartado de antecedentes generales se desarrolla primero la evolución de las fachadas de vidrio haciendo un breve recorrido histórico desde el origen del vidrio hasta los acristalamientos en actualidad, pasando por diversos hitos que lo han hecho evolucionar como elemento arquitectónico. Después en el apartado del vidrio se explican los aspectos técnicos más relevantes para este proyecto, como son la composición química, propiedades físicas, las propiedades mecánicas necesarias para realizar las simulaciones (principalmente densidad, modulo elástico E y coeficiente de poisson), los tipos de vidrio, ya que cada uno tiene una resistencia y comportamiento estructural diferente y por último se ha elaborado un apartado relacionado con la distribución de las tensiones en el que se explica como influye cada característica/ parámetro en este aspecto.

Los antecedentes específicos recogen en primer lugar documentación concreta sobre los anclajes puntuales, es decir, tipos de anclajes, tipos de juntas elásticas y tolerancias y en segundo lugar se ha incluido un apartado sobre simulación que se ha estructurado primero con los conceptos básicos de aplicación a la simulación de paneles de vidrio con anclajes puntuales. Después se ha explicado la utilización del programa SJ-Mepla, que es un programa de simulación específico para esta aplicación y por último se ha elaborado una sección explicando los criterios generales que se han utilizado en la mayoría de las simulaciones hechas con Straus7. Los criterios específicos de cada simulación aparecen en el apartado 7.

Capítulo 4:

Se definen los parámetros comunes y las variables de estudio en función de cada caso concreto:

En todos los casos se ha empleado un vidrio laminado con PVB de 8+0,76+8mm de espesor y unas aberturas en el vidrio de 36mm de diámetro para pernos de 34mm de diámetro con juntas elásticas de 2mm de espesor.

Para cada caso se ha utilizado siempre la misma hipótesis de carga, variando la distancia de los pernos a los lados, el tipo de perno, el material de la junta elástica y la holgura entre el perno y el hueco.

Capítulo 5:

Este apartado se centra en los autores que han investigado sobre la influencia que los desperfectos superficiales, como fisuras y microfisuras en paneles de vidrio, tienen sobre el valor máximo de la resistencia a tracción de estos.

Capítulo 6:

Recoge investigaciones que diferentes autores han empleado para estudiar algunos aspectos específicos del comportamiento de los paneles de vidrio, como el diseño de los anclajes puntuales.

El apartado 6.1 hace mención a un tipo de procedimiento basado en elaborar una serie de gráficas de fácil acceso, que permita diseñar una barandilla con unas determinadas características de forma sencilla.

En el apartado 6.2 se exponen varios modelos de cálculo desarrollados por los autores más destacados en la materia, para el diseño de las perforaciones en vidrio estructural. El primero, mediante simulación por elementos finitos y los demás por técnicas analíticas.

El apartado 6.3, es un breve estudio comparado sobre como influye el tipo de perno y el material elástico, dispuesto entre el perno y el panel, en la distribución de las tensiones alrededor del hueco en el panel de vidrio.

El apartado 6.4 también es un estudio comparado, sobre la repercusión de la holgura en la formación de tensiones puntuales no deseadas en el contorno del taladro. Resulta interesante por la destacable diferencia que se produce entre las holguras más grandes y las más pequeñas.

Capítulo 7:

Se analizan diferentes casos de estudio, que se han simulado variando un determinado parámetro para observar como influye y en que magnitud afecta a la distribución de tensiones alrededor del hueco en el panel de vidrio.

Los casos a estudiar son:

En el apartado 7.3 se compara una barandilla anclada solo con dos pernos, entre el programa ClearSight y Straus7. Después se simula una barandilla con dos anclajes en cada esquina inferior y se contrastan los resultados con los obtenidos previamente.

En el apartado 7.4 se analiza el comportamiento de un panel para fachada con un anclaje en cada esquina, variando la distancia a los bordes más cercanos.

En el apartado 7.5 se estudia un panel de vidrio cuadrado con un hueco central sometido a una carga lineal uniformemente repartida, donde se reducen las dimensiones del panel para observar como afecta a la ovalización del hueco y en consecuencia a la generación de tensiones puntuales no deseadas en el contorno del mismo.

1.4. ABSTRACT:

This investigation aims to study the structural behaviour of point fixing glass panels where the drills are located, specially in the drill's ring, in order to develop how forces distribute along the hole's perimeter. To perform this goal a FEM program (Straus7) has been used to simulate the structural behaviour of glass panels.

Chapter 7 contains the experimental investigation based on FEM simulations focus on three different examples:

Chapter 7.3 develops a balustrade by testing varied load cases of 0,8N/mm and 1,6N/mm and comparing a railing with a single bolt in every bottom corner and a second railing with two bolts in the bottom corners spaced 250mm in the vertical axis.

Chapter 7.4 analyzes the behaviour of a glass panel for a façade which bears a wind load equal to 0,1N/mm². The distance between the panel's edge and the drill's center is the only parameter changed, using 200mm, 150mm and 100mm.

Chapter 7.5 studies a square glass panel with a central hole of 36mm of diameter, which supports a tension stress equal to 21N/mm² and 40N/mm² applied on the top edge. The edge's panel measure is reduced from 1000mm to 200mm to understand its influence on the drill strain and the appearance of additional stresses in its ring.

2. OBJETIVOS DE TRABAJO

2.1.OBJETIVOS GENERALES

- A. Conocer el funcionamiento de programas tipo FEM
- B. Comparar varios programas de cálculo mediante elementos finitos, para averiguar sus ventajas y desventajas.
- C. Estudiar las técnicas desarrolladas por algunos investigadores para investigar el comportamiento de los paneles alrededor del hueco en función de distintos parámetros.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Predecir el comportamiento tensional de paneles de vidrio mediante simulaciones con elementos finitos.
- B. Comparar las diferencias en la distribución de tensiones entre los anclajes cilíndricos y troncocónicos (o avellanados).
- C. Conocer la influencia de la deformación del hueco en la generación de tensiones puntuales adicionales.
- D. Determinar la relación existente entre la deformación del hueco y el índice λ (diámetro del hueco entre el lado del panel).
- E. Estudiar la distribución de las tensiones alrededor del hueco utilizando diferentes aplicaciones como barandillas y paneles para fachadas.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. ANTECEDENTES GENERALES

3.1.1. Breve introducción a la evolución de las envolventes de vidrio

El origen del vidrio¹:

La obtención del vidrio fue descubierta hacia el 3000 a. de C. en el Oriente Próximo.

El vidrio transparente ya se conocía en Egipto alrededor del 1500 a. de C. y aunque tuvo una gran importancia comercial fue en Fenicia/ Siria hacia el siglo I a. de C. donde se inventó el vidrio soplado. Esta técnica rápidamente se extendió por el imperio romano y la posibilidad de fabricar artículos de vidrio a gran escala lo convirtió en un material de uso más frecuente tanto en cristalerías como en recipientes.

Las vidrieras²:

Los primeros ejemplos aún conservados de vidrieras en iglesias datan del siglo XI. Durante los siglos XIII y XIV surge el apogeo de las vidrieras en arte gótico, principalmente en Francia e Inglaterra. Para la construcción de las vidrieras se cortaban las piezas de vidrio con unas dimensiones y formas determinadas, después se encajaban en unas varillas de plomo y por último se montaba todo en una estructura de acero.

La aparición de los botánicos s. XIX:

En los comienzos del siglo XIX, Claudius Loudon y Joseph Paxton dos pioneros en este tipo de construcciones comenzaron a desarrollar nuevos métodos para generar unas condiciones climáticas favorables a las plantas exóticas que deseaban cultivar, puesto que eran horticultores y paisajistas. Al hacerlo crearon estructuras de acero ligeras y acristaladas para maximizar la entrada de luz natural. Algunos ejemplos de esta arquitectura son:

- Casa de cristal, “*Cristal Palace*”, Sydenham en 1854

¹ <http://www.saber.golwen.com.ar/hvidrio.htm>

² <http://www.saber.golwen.com.ar/hvidrio.htm>

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

- “Palm House in Kew Gardens, London (izq.) y en Bicton Gardens (dcha.)”



Ilustración 1: Palm House in Kew Gardens, London. 1845-1848.
http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Kew_Gardens_Palm_House,_London_-_July_2009.jpg



Ilustración 2: “Palm House at Bicton Gardens”, 1843.
<http://www.gardenworldimages.com/Details.aspx?ID=4463&TypeID=1&searchtype=&contributor=0&licenses=1,2&sort=REL&cduonly=False&mronly=False>

Las bóvedas acristaladas:



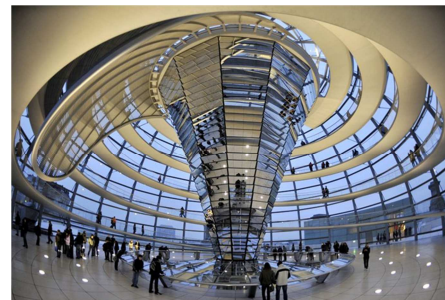
Ilustración 3: Galería Vittorio Emanuele II.
<http://us.fotolia.com/id/10325844>

La Galería Vittorio Emanuele II, construida entre el 1865-67 y diseñada por el arquitecto Giuseppe Mengoni, es uno de los máximos exponentes de las bóvedas de vidrio.

“A comienzos del siglo XX una nueva generación de arquitectos reconocieron el potencial visual de este nuevo método constructivo. Grandes superficies acristaladas, ortogonalidad en los diseños, y transparencia se convirtieron en las reglas principales de este nuevo estilo, basado en la arquitectura del vidrio”³.

A lo largo del siglo XX, arquitectos e ingenieros han colaborado para reducir el material opaco dentro de la estructura, hasta haber conseguido a finales de siglo acristalamientos prácticamente transparentes en su totalidad.

Ilustración 4: Foster & Partners, cúpula de Reichstag, Berlín, 1998.
http://www.heraldo.es/noticias/internacional/cierran_cupula_del_reichstag_ante_posible_atentado.html



³ Jan Wurm. Glass Structures. p.11

Los rascacielos:



Edificio Seagram en Nueva York. Este edificio al igual que innumerables iconos de la arquitectura de los rascacielos reproduce una cortina de cristal. En su caso particular con vidrio marrón y un armazón de acero y bronce. En este periodo el anclaje más común consiste en unir los paneles en todo su perímetro a una estructura portante. Este edificio es modelo de referencia para la arquitectura de los años 60 y 70.

Ilustración 5: Edificio Seagram.
<http://www.disenoyarquitectura.net/2009/03/edificio-seagram-1954-nueva-york-mies.html>

3.1.2. El vidrio

3.1.2.1. Composición del vidrio y principales propiedades físicas⁴:

Tipos de vidrio: los más representativos son el vidrio de sílice (SiO_2), caliza (CaO) y óxido de sodio (NaO) y el vidrio de borosilicato.

El vidrio de SiO_2 , CaO y NaO , es el más empleado en vidrio flotado según la norma DIN EN 572-1, DIN EN 572-2 y DIN 1249-3,-10,-11

El vidrio de borosilicato se utiliza para aplicaciones de protección contra el fuego por su alta resistencia a los cambios de temperatura y alta resistencia química. DIN EN 1748-1

⁴ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.11-12

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Componentes	Vidrio de sílice	Vidrio de borosilicato
SiO ₂	69 – 74%	70 – 87%
CaO	5 – 12%	-
B ₂ O ₃	-	7 – 15%
Na ₂ O/K ₂ O	12 – 16%	0 – 16%
MgO	0 – 6%	-
Al ₂ O ₃	0 – 3%	0 – 8%
Otros	-	0 – 8%

Tabla 1: Composición del vidrio

Propiedades	Unidades	Vidrio de Sílice	Vidrio de borosilicato
Densidad (a 18°C)	ρ [Kg/m ³]	2500	2200 - 2500
Dureza	[KN/mm ³]	6	4,5 - 6
Módulo de elasticidad	[N/mm ²]	70.000 - 78.000	60.000 - 70.000
Coeficiente de Poisson	ν [-]	0,20-0,23	0,20
Coeficiente de dilatación térmica	α_t [1/K]	$9 \cdot 10^{-6}$	$3,1 - 6,0 \cdot 10^{-6}$
Conductividad térmica	λ [W/(m.K)]	1,0	1,0

Tabla 2: Principales propiedades física

3.1.2.2. Propiedades mecánicas del vidrio⁵

Resistencia del vidrio:

El vidrio muestra un comportamiento lineal en el gráfico de tensión deformación y tiene una rotura frágil.

Con respecto a la resistencia a tracción existe una diferencia representativa entre los valores teóricos entre 10000-30000N/mm² [Siebert 1999] y los obtenidos mediante ensayos experimentales. Esta diferencia depende de la calidad de la superficie del panel, de la duración de la carga y de las condiciones climáticas.

Para determinar la resistencia a flexión de paneles de vidrio existe un ensayo en el que éste se apoya en cuatro puntos (*“the four point bending test”*) [DIN EN 1288-1 a 5]

⁵ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.16-19

Valores característicos de la resistencia del vidrio a flexión de lado de las tracciones (ver referencia 5):

Producto	Normativa	Resistencia a flexión del lado de las tracciones (N/mm^2)
Vidrio flotado (float glass)	DIN 1249-10 DIN EN 572-2	45
Vidrio templado (thermally toughened glass)	DIN 1249-12 DIN EN 12150-1	120
Vidrio termoendurecido (heat strengthened glass)	DIN EN 1863-1	70

Tabla 3: Valores característicos de la resistencia del vidrio a flexión del lado de las tracciones

Esta autora alemana ofrece una amplia bibliografía de referencia sobre investigaciones centradas en la resistencia a flexión del lado de las tracciones en vidrio. Ver [Wilikins et al. 1976], [Schmitt et al. 1983], [Exner 2001 a, b, c], [Siebert 1999] y [Siebert 2001]. El problema de esta bibliografía es que es de origen alemán, por lo que sería conveniente encontrar versiones en inglés. Para conocer los principios básicos y métodos experimentales para determinar la resistencia del vidrio consultar [HVG 1987]. (La bibliografía que figura en las páginas 13 y 14 se puede consultar en la tesis de Iris Maniatis, ver referencia 5)

Con respecto a la normativa de la tabla anterior solo en el caso del vidrio flotado se define la resistencia a compresión del vidrio que se encuentra entre 700 y 900 N/mm^2 .

Para análisis avanzados sobre el comportamiento del vidrio bajo los efectos de la fatiga se puede consultar la bibliografía de [Fink 2000]. En sus experimentos determina que la resistencia del vidrio bajo una carga continua expuesta a lo largo del tiempo es menor que la mínima resistencia en ensayos sin fatiga.

Resistencia del vidrio en los bordes:

Es esencial que la calidad del contorno del panel y del taladro sea buena para evitar que la resistencia a tracción no disminuya. Además el borde interior de los taladros configura la parte del panel donde se generan las tensiones más altas.

[Weibmann 2004] realizó un ensayo para estudiar como influye el tipo de corte en la resistencia a tracción del panel cerca de la zona de los bordes del panel.

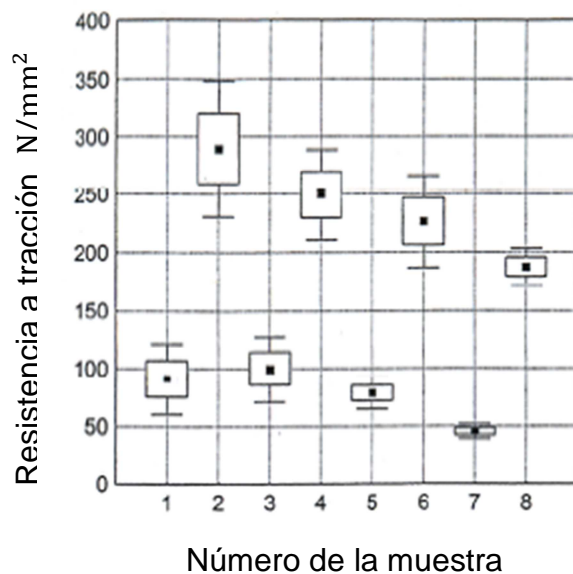


Ilustración 6: Resistencia en los bordes del panel

Núm. de muestra	Tipo de vidrio/tratamiento
1	Flotado/lado cortado
2	Templado/lado cortado
3	Flotado/"C-grinding", tipo radial
4	Templado/"C-grinding", tipo radial
5	Flotado/"double sided bordered", achaflanado
6	Templado/"double sided bordered", achaflanado
7	Flotado/Chorro de agua
8	Templado/Chorro de agua

Tabla 4: Tipos de corte

Este estudio proporciona información muy valiosa, que orienta sobre como influye el tipo de vidrio y el tratamiento de corte que se le ha aplicado.

En todos los casos el vidrio templado tiene una resistencia notablemente mayor que el vidrio sin ningún tratamiento térmico. Además existe una diferencia significativa entre el corte normal (muestras 1 y 2) y con chorro de agua (muestras 7 y 8), de manera que la resistencia se ve reducida de forma apreciable en ambos vidrios.

Resistencia del vidrio en los taladros:

[Kutterer, Goerzing 1997] llevó a cabo investigaciones experimentales sobre la resistencia de paneles de vidrio flotado y templado con taladros para anclajes puntuales. Ambos bajo esfuerzos de tracción aplicado en el sentido del panel (tracción pura). Se examinaron los huecos practicados con fresadora con punta de diamante y con chorro de agua. Los resultados mostraron que el daño ocasionado en la perforación fue ligeramente mayor con el chorro de agua que con la fresadora, por lo tanto la tensión de rotura sería mayor, sin embargo la diferencia entre ambos es tan pequeña que no se observaron pérdidas relevantes de resistencia.

3.1.2.3. Tipos de vidrio

3.1.2.3.1. Vidrio recocido (annealed glass)

El vidrio recocido es la versión más sencilla del vidrio flotado, ya que no ha sido sometido a ningún tipo de tratamiento térmico. En consecuencia rompe en grandes fragmentos afilados, de manera que por razones de seguridad su empleo en aplicaciones estructurales está completamente prohibido.

3.1.2.3.2. Vidrio termoendurecido

Regulado según DIN EN 1863-1

Su producción es muy similar a la del vidrio templado, la diferencia está en que el proceso de enfriado es más lento en este caso, por lo que la resistencia residual es menor en la capa de compresión comparándolo con el templado y su capacidad de soportar esfuerzos de tracción disminuye. Un aspecto positivo en comparación con el vidrio templado es que tiene un mejor comportamiento post-rotura en vidrios laminados, porque los fragmentos son de mayor tamaño.

3.1.2.3.3. Vidrio templado

El vidrio templado⁶ consiste en un vidrio recocido (annealed glass) que ha sido sometido a un tratamiento térmico en torno a 650°C para ser después enfriado rápidamente. El beneficio que se consigue con esta práctica es la de conferir al panel de vidrio un estado tensional tal, que las capas exteriores quedan sometidas a esfuerzos de compresión. Al hacer esto las cargas que se apliquen

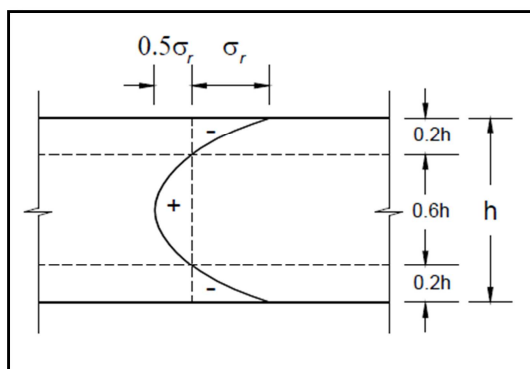


Ilustración 7: The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p.5, ver referencia 6

después, y originen solicitaciones de tracción o flexión (del lado de las tracciones) deben superar la compresión adquirida para que la presencia de las fisuras comience a tenerse en cuenta. En Europa la tensión de compresión a la que queda sometido el panel oscila entre los 90MPa y los 140 MPa.

La imagen 7 detalla la distribución parabólica de las tensiones internas como consecuencia del tratamiento

térmico del vidrio templado.

⁶ The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p.4 y 5: http://www-eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatitis_%20paper.pdf

Una segunda ventaja de este material consiste en que cuando rompe, lo hace en diminutos cristales en forma de cubo que minimizan hasta prácticamente anular el riesgo por corte.

Aspectos relativos a la seguridad:

“Generalmente las normativas en todo el mundo establecen que todos los vidrios estructurales tienen que ser laminados, incluso los templados.

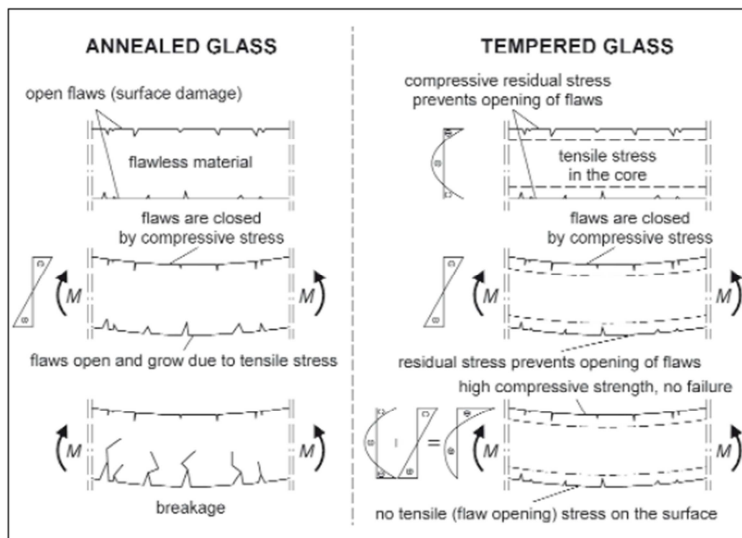


Ilustración 8: Paper. Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 22

La problemática que plantea esta situación es que las láminas intermedias de PVB y SGP son estables a temperaturas comprendidas entre los 10°C y los 20°C⁷.

Las temperaturas exteriores pueden superar fácilmente estas temperaturas en las épocas más calurosas por tanto su capacidad

resistente no debe considerarse en los cálculos, solo como elemento de seguridad en caso de rotura del vidrio.

Comparando un vidrio recocido (annealed glass) con uno templado (tempered glass) se observa rápidamente los beneficios antes descritos. Mientras que el lado de las compresiones bajo un esfuerzo de flexión en el vidrio templado queda más solicitado que en el vidrio recocido, en el lado de las tracciones se contrarrestan los esfuerzos, minimizando el riesgo de rotura por la aparición de fisuras y grietas.

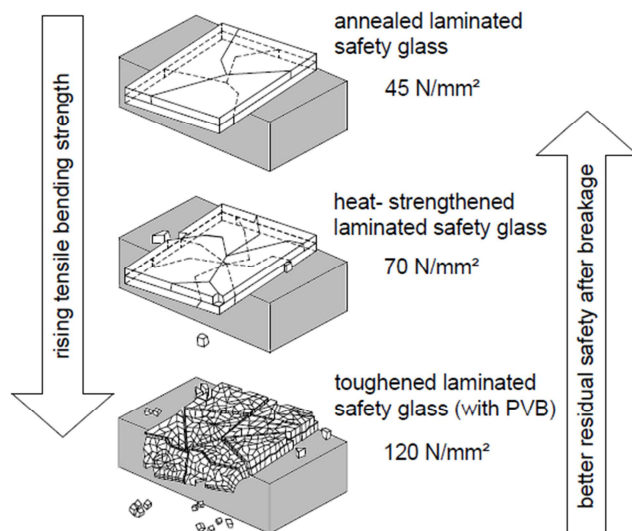
3.1.2.3.4. Vidrio laminado

El vidrio laminado consiste en dos o más láminas de vidrios unidas entre sí por una capa intermedia de un polímero transparente, normalmente de polivinilo de butirol (PVB). El hecho de laminar el vidrio no afecta significativamente en la propagación de las grietas, sin embargo tiene una importante influencia en el comportamiento post-rotura.

⁷ Structural Bearings In Holes In Glass (www.glassfiles.com)

El PVB es un material viscoelástico y por tanto está influenciado por la duración y magnitud de la carga, de manera que tenderá a estirarse a medida que estos parámetros aumentan de valor. La temperatura por el contrario afecta a su rigidez negativamente.

3.1.2.3.5. Resumen:



Cuanto mayor es el tratamiento térmico, tanto mayor es la resistencia a tracción del panel, debido al incremento de las tensiones internas de compresión en los planos superficiales del mismo.

En contraposición la capacidad residual post-rotura es menor en el vidrio templado que en el recocido. Cuanto mayor es el tamaño de los fragmento, mejor estabilidad.

Ilustración 9: Comparativa entre vidrio recocido, termoendurecido y templado. Glass Panel under Shear Loading- Use of Glass Envelopes in Building stabilization. p.7

En materia de seguridad los pequeños fragmentos que se forman al romperse el vidrio templado son inofensivos, mientras que los que se producen por rotura del vidrio recocido manifiestan un alto grado de peligrosidad, reconocido por numerosas normativas que prohíben su uso en aplicaciones estructurales.

3.1.2.4. Distribución de tensiones:

3.1.2.4.1. Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio⁸:

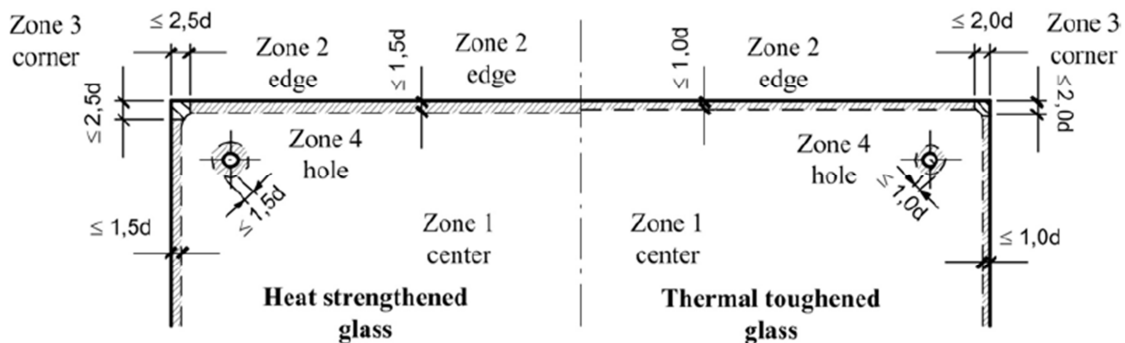


Ilustración 10: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio. Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.14

[Siebert 2001]: Estableció por primera vez la existencia de cuatro zonas diferenciadas dentro de un panel, que son la superficie del panel o zona central (zona 1), los lados (zona 2), las esquinas (zona 3) y los huecos (zona 4)

[Wilfried Laufs 2000], establece en su tesis una distancia mínima entre el taladro y los laterales más cercanos del panel de manera que para el vidrio termoendurecido se aconseja una distancia mínima de al menos 3 veces el espesor del panel " d " y para el vidrio templado una distancia igual a $2d$.

Zona 1: Centro

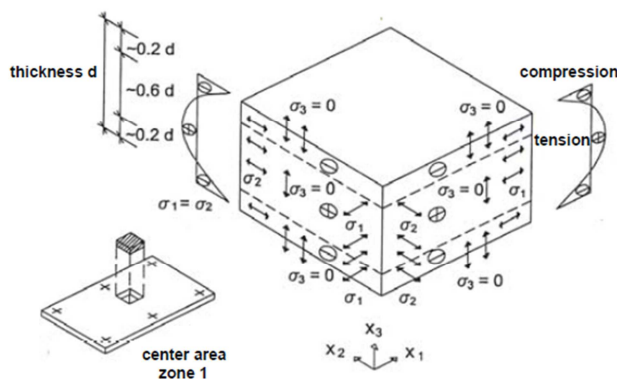


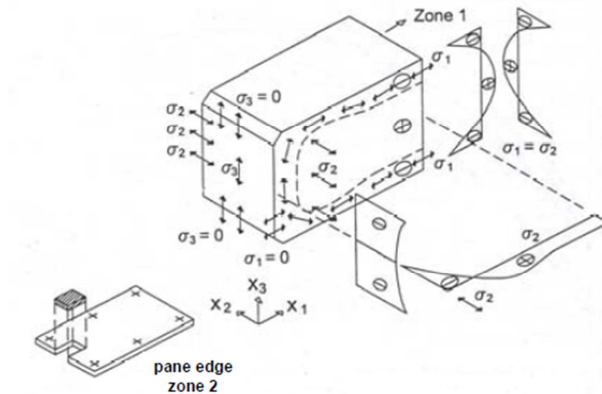
Ilustración 11: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 1.

Existen dos capas virtuales en las cuales la tensión interna es igual a cero.

Según la imagen 11 las tensiones paralelas al plano de la placa de vidrio representan las tensiones de tracción y compresión, mientras que las tensiones perpendiculares al plano del panel son nulas.

⁸ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.14-16

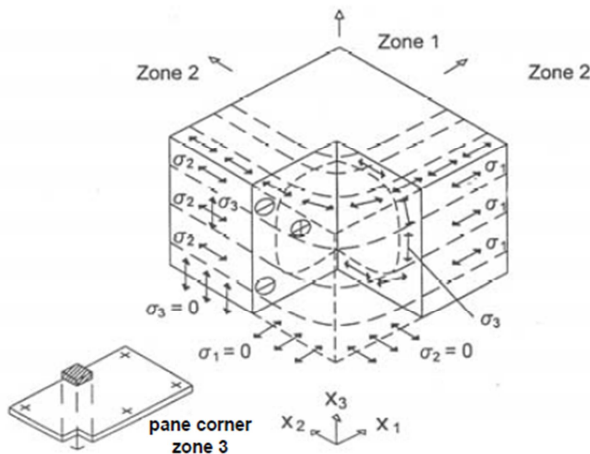
Zona 2: Lado



En la zona del borde sometido a compresión, existen solicitaciones a compresión en la dirección de σ_2 , pero en el sentido de σ_3 es igual a cero, para asegurar el equilibrio de tensiones.

Ilustración 12: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 2.

Zona 3: Esquina



Por razones de equilibrio de tensiones se considera que no existen tensiones internas de compresión en el área afectada por el tratamiento térmico.

Ilustración 13: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 3.

Zona 4: Taladro cilíndrico y troncocónico o avellanado

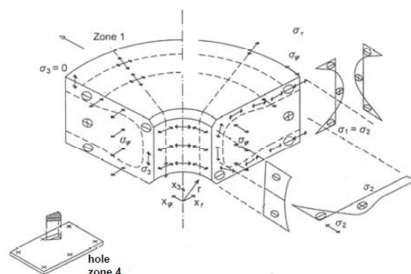


Ilustración 14: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 4

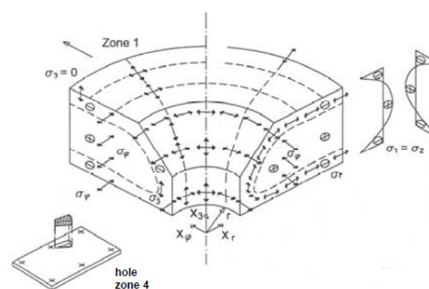


Ilustración 15: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 4

3.1.2.4.2. Predicción tensional del vidrio:

Procedimientos para determinar la resistencia del vidrio⁹

Teóricamente el vidrio tiene una resistencia de rotura de 21 N/mm². El vidrio sometido a tensiones de larga duración, como la carga permanente, según *Pilkington Glass Consultants (1997)*; *Institution of Structural Engineers (2000)* soporta aproximadamente 8 N/mm².

La resistencia del vidrio depende de los siguientes parámetros:

- Duración de la carga
- Superficie del panel sometido a esfuerzos de tracción
- Condiciones medioambientales, especialmente la humedad
- Magnitud y distribución de las cargas a tracción en la superficie del panel de vidrio

Para conseguir una aproximación lo más precisa posible de la resistencia a tracción del vidrio se debe partir de la mecánica de fractura elástica lineal (*linear elastic fracture mechanics*), según desarrollan autores como “*Fischer-Cripps & Collins*” y “*Overend et al*”.

$$\sigma_f = k_{mod}\sigma_s + \sigma_r/\gamma_\vartheta$$

Donde σ_f es la resistencia a tracción instantánea del vidrio. $k_{mod}\sigma_s$ es la resistencia del vidrio sin tratamiento térmico. Este término está compuesto de la tensión de rotura instantánea en vidrio recocido, σ_s y el coeficiente de modificación (*modification factor*) k_{mod} . Según la norma prEN 13474¹⁰ los valores más comunes para k_{mod} son 0.72, 0.36 y 0.27 para cargas de corta, media y larga duración respectivamente. Para consultar información más detallada sobre k_{mod} se puede examinar a Haldimann y Overend.

El término $\sigma_r/\gamma_\vartheta$ indica el incremento de tensión aportada por el proceso de templado del vidrio, de manera que σ_r es la tensión de compresión superficial del panel, que en Europa oscila entre 90 y 140 N/mm² y en Norte América $\sigma_r \geq 69\text{N/mm}^2$. γ_ϑ es el coeficiente de seguridad que depende del nivel de control del proceso de templado. Normalmente oscila entre 1.5 y 2.3.

⁹ Dr. Mauro Overend and Dr. Ing. Iris Maniatis. *The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections*. p. 6-8

M. Overend. Optimizing connections in structural glass. Apartado: tensile strength of glass

¹⁰ prEN 13474: <http://es.scribd.com/doc/37264156/prEN-13474-1-99-Glass-in-Bldg-Basis-of-design>.
Tabla 6, p. 19

El valor σ_r varía en función de la zona del panel que se trate (esquina, lado, hueco o centro), por lo que hay que tener en cuenta en que sección del panel se está trabajando.

La resistencia a tracción instantánea del vidrio σ_f se calcula para paneles sometidos a una tensión uniforme en toda su superficie. En la realidad esto es improbable que ocurra, por tanto para obtener una mayor precisión hay que dividir el panel en zonas en las que el valor de la tensión sea prácticamente uniforme. Para expresar esto de forma analítica se recurre a la siguiente fórmula:

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{A} \int_{area} (c_b \sigma_{max})^m dA \right]^{1/m}$$

Donde A es la superficie total del panel, dA es el área de las zonas divididas. σ_{max} es la mayor tensión a tracción de cada división, m es el parámetro de resistencia superficial (*surface strength parameter*) que normalmente es 7,3. c_b es el coeficiente de modificación de tensión biaxial (*biaxial stress modification factor*) que de forma conservadora puede escogerse el valor de la unidad. Para calcularlo de forma exacta se puede acudir a Beason & Morgan¹¹. La procedencia de la fórmula figura en [Overend et la].¹²

Para conseguir que el diseño se realice bajo condiciones de seguridad hay que garantizar que:

$$\sigma_f \geq \sigma_p$$

¹¹ Beason W.L. and Morgan J.R. ‘Glass Failure Prediction Model’ , ASCE J. Struct. Eng., 110(2): 197-212, 1984.

¹² Overend M, Parke GAR, Buhagiar D. Predicting failure in glass - A general crack growth model. ASCE J. Struct. Eng. FORTHCOMING August 2007.

3.1.2.4.3. Distribución de las tensiones en un panel de propiedades isotrópicas con un hueco circular¹³:

- Panel de superficie infinita con un hueco circular:

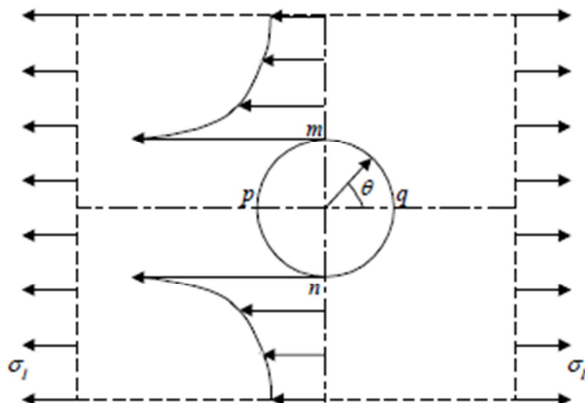


Ilustración 16: Distribución de las tensiones hasta m y n

Cuando se practica una perforación la distribución de las tensiones en la superficie del panel deja de ser homogénea, aumentando exponencialmente hacia los puntos m y n . En estos dos puntos la tensión de tracción alcanza $\sigma_{m,n} = 3\sigma_1$.

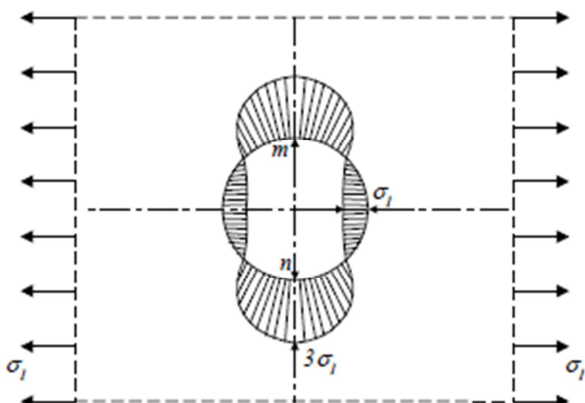


Ilustración 17: Distribución de las tensiones en el borde del taladro

Por el contrario en los puntos p y q se generan tensiones de compresión de manera que $\sigma_{p,q} = -\sigma_1$.

La ilustración 17 corresponde a la distribución de las tensiones a lo largo del contorno del hueco.

A partir de estos datos puede hallarse el coeficiente de concentración de tensiones K (Dependiendo de la bibliografía la nomenclatura para designar este concepto varía pudiendo usarse K ó α). Este coeficiente se define como la relación entre la tensión en un punto concreto del panel, que hay considerando una misma hipótesis de carga, para el mismo panel con y sin hueco. Esto significa que $K=3$ en m y n , mientras que en p y q $K= -1$.

[Timoshenco et al. 1970]¹⁴ desarrolló las fórmulas para el cálculo de tensiones sobre un panel de dimensiones infinitas con una perforación circular, sujeto a una tensión uniforme de tracción.

¹³ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.39-48

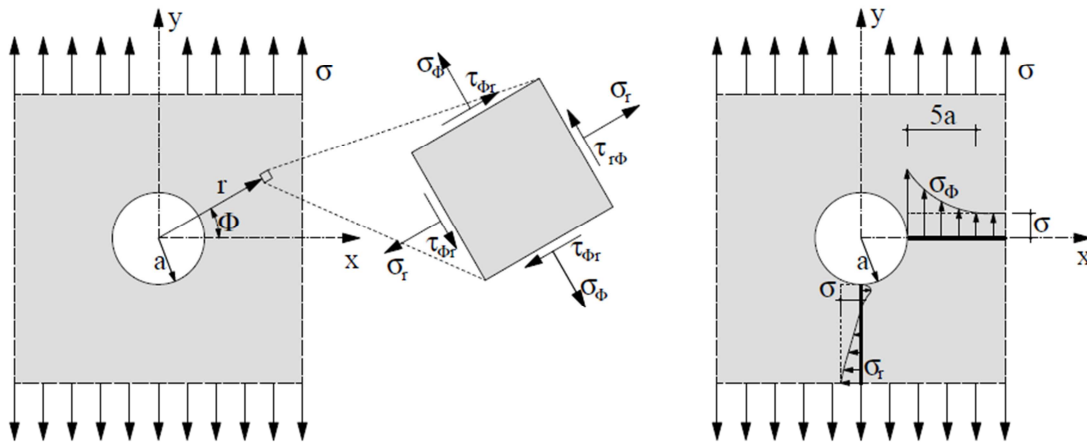


Ilustración 18: Hueco en un panel de dimensiones infinitas. Definición de tensiones en una sección cualquiera. Distribución de tensiones en el panel en la línea perpendicular a las cargas que pasa por el centro del hueco

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\phi \\ \sigma_\phi &= \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\phi \\ \tau_{r\phi} &= -\frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\phi\end{aligned}$$

Siendo: σ_r : la tensión radial. σ_ϕ : la tensión tangencial y $\tau_{r\phi}$: el esfuerzo a cortante. Mediante las coordenadas polares r y ϕ se define la posición del punto cuyas tensiones se desea calcular.

Cuando $r=a$ (ver ilustración 18), es decir, cuando σ_ϕ corresponde a las tensiones a lo largo del perímetro del taladro, entonces:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_\phi &= \sigma(1 - 2 \cos 2\phi) \\ \tau_{r\phi} &= 0\end{aligned}$$

Es decir, solo existen tensiones tangenciales en el borde del hueco.

¹⁴ Timoshenko, S.O., Goodier, J.N. *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York 1970.

Para los casos en que el ángulo ϕ es igual a $\pi/2$ ó $3\pi/2$, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{3\sigma}{2} \left(\frac{a^2}{r^2} - \frac{a^4}{r^4} \right) \\ \sigma_\phi &= \frac{\sigma}{2} \left(2 + \frac{a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \\ \tau_{r\phi} &= 0\end{aligned}$$

En la tesis de Iris Maniatis¹⁵ se desarrolla con mayor profundidad el estudio analítico y formulación de la distribución de tensiones en paneles de material isotrópico.

- Panel de superficie semifinita y finita con hueco circular sometido a una tensión uniforme de tracción:

En la ilustración 18 el análisis teórico de la distribución de tensiones se hace sobre un panel de superficie infinita. El siguiente ejemplo es igual, pero definiendo una anchura específica H .

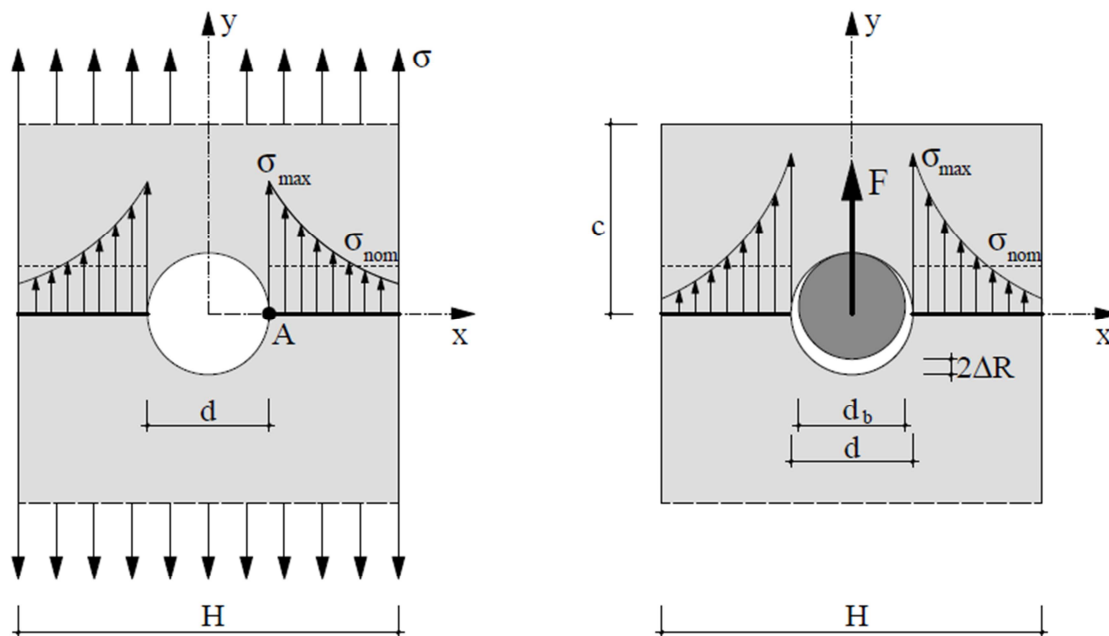


Ilustración 19: Distribución de las tensiones en el segmento perpendicular a las cargas, que pasa por el centro del hueco.

¹⁵ Numerical and experimental investigations on the stress distribution of bolted glass connections under in-plane loads. p. 39

Siendo σ_N la tensión equivalente en (H-d), también llamada tensión nominal

$$\sigma_N = \frac{F}{(H-d)t}$$

Este valor por sí solo no tiene ninguna validez, puesto que la distribución de las tensiones a lo largo del eje y, desde el borde exterior hasta el lado del hueco muestra una tendencia ascendente.

En términos generales se puede considerar que:

$$\sigma_{\phi max} = K \sigma_N$$

$$K = \frac{\sigma_{\phi max}}{\sigma_N}$$

$$K = \frac{\sigma_{\phi max}(H-d)t}{F}$$

Siendo K el factor de concentración de tensiones.

Existen diferentes modos de determinar el coeficiente de concentración de tensiones K , en base a estudios experimentales desarrollados por diferentes investigadores:

Según “*Pilkey 1997*”, para un índice $d/H < 0,5$:

$$K = 2,00 + 0,284 \left(1 - \frac{d}{H}\right) - 0,6 \left(1 - \frac{d}{H}\right)^2 + 1,32 \left(1 - \frac{d}{H}\right)^3$$

Según “*Heywood 1952*”, mediante un método empírico concluyó que para todos los valores de d/H :

$$K = 2 + \left(1 - \frac{d}{H}\right)^3$$

Según “*Peterson 1953*” el valor del factor de concentración de tensiones K es:

$$K = 3,00 - 3,13 \left(\frac{d}{H}\right) + 3,66 \left(\frac{d}{H}\right)^2 - 1,53 \left(\frac{d}{H}\right)^3$$

Valor del coeficiente de concentración de tensiones K (según Peterson), en función del índice $\lambda=a/b=d/H$ ($d=2a$ y $H=2b$)

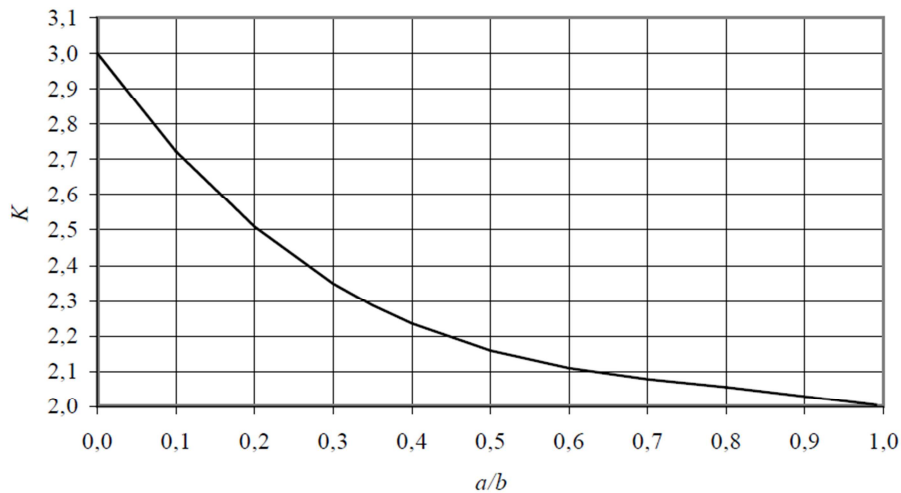


Ilustración 20: Factor de concentración de tensiones (SCF) en función del índice $a/b=\lambda$. Ver referencia 15, tesis de Iris Maniatis, p 48.

De esta manera cuando el índice $\lambda = a/b$, tiende a cero ($b \rightarrow \infty$), $K=3$ y cuando $a \approx b$, $\lambda=1$ y $K=2$.

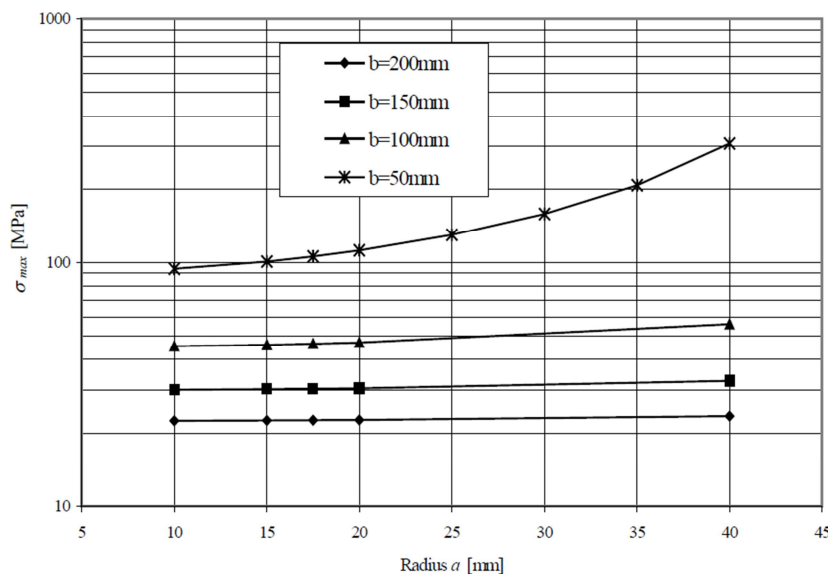


Ilustración 21: Tensión de tracción máxima en función del radio a y la distancia b (1/2 del ancho). Ver referencia 15, tesis de Iris Maniatis, p 48.

La reducción del valor de K , ocurre porque cuanto menor es la distancia entre el hueco y el lateral, menor es la diferencia entre la tensión nominal σ_N y la tensión a tracción máxima $\sigma_{\phi max}$. Como K , de forma

simplificada es igual a: $K = \sigma_{\phi max} / \sigma_N$,

cuanto más cercanos sean los dos valores menor será K , sabiendo que $K \geq 2$.

Ilustración 21: Gráfico de las máximas tensiones en el borde del taladro en función del radio a y del semilado b

- Panel de superficie finita con hueco circular sometido a una carga a través del perno de conexión:

[Frocht et al. 1940] realizó investigaciones experimentales con paneles de aluminio de diferentes anchuras. Como conclusión determinó que el índice d/H , es decir la relación entre el diámetro del hueco y ancho de panel, es el factor que más influye sobre el coeficiente K . Al disminuir el índice d/H , aumenta el coeficiente K . Otro factor que interviene es la holgura entre el perno y el taladro, de manera que cuanto mayor es ésta, tanto mayor es el coeficiente K . Si se cumple que la holgura, $\Delta R=0$, y el índice $c/H>1$ acuerdo con “Frocht et al. 1949”, el factor de concentración de tensiones se puede hallar mediante la siguiente fórmula:

$$K = 12,882 - 52,714 \left(\frac{d}{H} \right) + 89,762 \left(\frac{d}{H} \right)^2 - 51,667 \left(\frac{d}{H} \right)^3$$

Para el diseño de vidrio estructural, el coeficiente K más utilizado es el de Peterson (ver punto anterior). En su fórmula, el coeficiente de concentración de tensiones se ve afectado por la distancia al borde “ c ”, el ancho “ H ”, el espesor “ t ”, y por la holgura “ ΔR ”.

3.1.2.4.4. Influencia de la excentricidad en la distribución de las tensiones al aplicar una carga¹⁶

En la práctica son muy comunes las imperfecciones y errores de ejecución. Por esta razón es de especial interés la influencia de las excentricidades a la hora de someter a un panel de vidrio a cargas centradas paralelas al plano del panel.

La zona roja de la ilustración 22 representa el área de compresiones y la morada, la de tracciones, como consecuencia de una carga puntual P . En las imágenes de la izquierda P se ha aplicado en el plano medio de la sección, según indican las flechas de σ_{\max} (del lado de las tracciones) y σ_{\min} (del lado de las compresiones). Las tensiones se distribuyen uniformemente dentro del espesor y σ_{\max} y σ_{\min} se localizan en el centro de la sección.

¹⁶ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.111

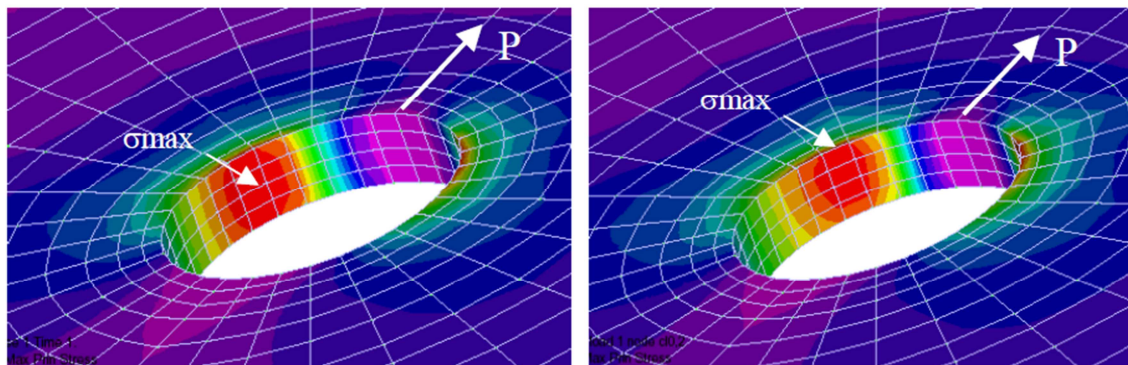


Ilustración 22: Distribución de las tensiones en el canto del hueco al aplicar una carga centrada

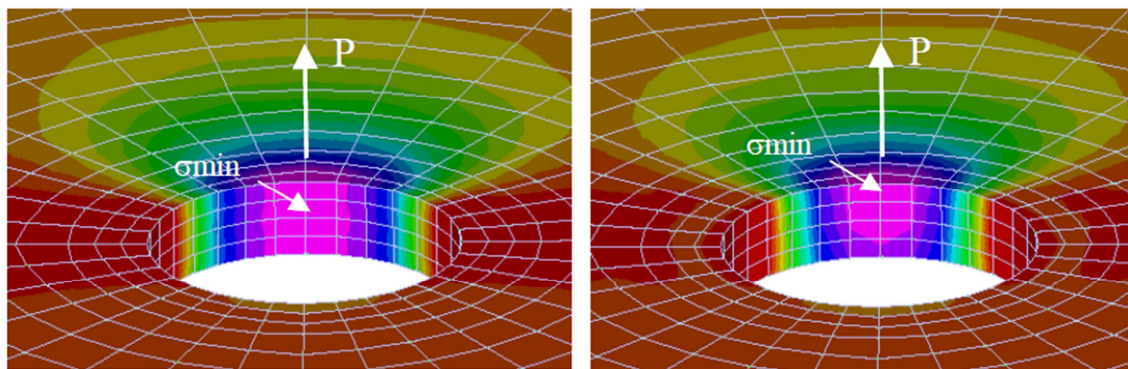


Ilustración 23: Distribución de las tensiones en el canto del hueco al aplicar una carga descentrada

En las imágenes de la derecha se observa que las tensiones mínimas de compresión y máximas tracción se encuentran en el plano lateral donde se ha aplicado la carga. Por tanto la distribución de tensiones deja de ser uniforme y pasa a concentrarse en los puntos indicados por las flechas de σ_{\max} y σ_{\min} . Es importante que esto ocurra lo menos posible ya que las tensiones máximas son mayores cuando se produce una excentricidad.

3.2. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

3.2.1. Tipos de anclajes puntuales en vidrio laminado

3.2.1.1. Anclajes pasantes con pernos

“Durante los últimos 50 años ha habido una rápida evolución en la aplicación de elementos de vidrio en la edificación; desde los acristalamientos sujetos en todo su perímetro, asociados a los muros cortina inventados a mediados del siglo 20, hasta los anclajes puntuales desarrollados entre el 1980 y 1990. Esta evolución surgió de la necesidad de la arquitectura para incrementar la transparencia de las estructuras de vidrio, disminuyendo las dimensiones y eliminando las estructuras sólidas que soportan el vidrio.

De esta manera el vidrio, que era un elemento de cubrición pasa a formar parte de las aplicaciones estructurales, donde se emplean los paneles como elementos portantes”¹⁷.

Los anclajes pasantes desde un punto de vista práctico no son la solución más acertada para las exigencias estructurales del vidrio, ya que por un lado la transmisión puntual de las cargas implica tensiones localizadas muy elevadas y por otro lado al practicar los taladros aparecen desperfectos, ralladuras y microfisuras que contribuyen a la pérdida de resistencia en esfuerzos a tracción. Por estas razones la transmisión de las cargas mediante uniones que abarquen todo el perímetro de los paneles es más eficaz, por facilitar un reparto mejor distribuido y evitar la perforación del panel con la consecuente formación de fisuras y/o desperfectos.

Sin embargo el alto valor estético que proporcionan los anclajes puntuales hace que a pesar de sus inconvenientes siga siendo muy demandado en modernas obras de construcción.

En consecuencia a la hora de poner esta técnica en práctica es necesario cuidar al máximo los detalles, tanto en el diseño, fabricación como en la ejecución y montaje en obra.

Para el diseño de los anclajes y paneles de vidrio, como práctica frecuente, se suele utilizar una combinación de los modelos de elementos finitos (FEA: Finite Element Analysis) y ensayos en laboratorio. De esta manera se obtiene mayor cantidad de información al respecto y se reduce la posibilidad de cometer errores.

¹⁷ The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p.5 y 6: http://www-g.eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatitis_%20paper.pdf

3.2.1.1.1. Pernos (countersunk fixing)

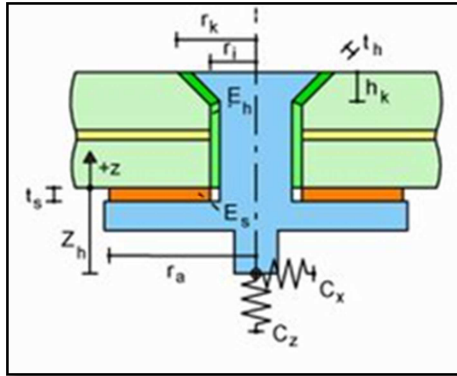


Ilustración 24: Countersunk fixing. Manual del programa SJ-Mepla

Se caracterizan por quedar alineados con la superficie exterior. Es necesario colocar juntas elásticas entre el metal y el vidrio para evitar tensiones puntuales no deseadas. Según la imagen 24 las juntas elásticas son las zonas coloreadas de verde y naranja.

En el mercado se encuentran dos tipos de pernos, los que tienen rótula y por tanto permiten cierta deformación al panel liberando así al anclaje de cierta tensión y

los que confieren una unión rígida entre el perno y la estructura portante.

La transmisión de cargas entre el vidrio y el perno de conexión puede efectuarse de dos maneras:

En cubierta la distribución de los esfuerzos es simétrica con respecto al eje del perno y se realiza a través del disco cuyo radio en la ilustración es igual a " r_a ", mientras que en fachada la sección de vidrio, que se encuentra justo sobre el taladro queda comprimida y la inferior traccionada como consecuencia del peso propio y comprimida por la deformación del hueco (ver "*apartado 6.2: Diseño de las perforaciones en vidrio estructural*"). Así la abertura tiende a adquirir la forma de un óvalo.

3.2.1.1.2. Perno anclado a una sola lámina de cristal del panel de vidrio laminado

Esta solución es parecida a la anterior con la diferencia de que el perno solo queda conectado a la lámina interior del panel de vidrio laminado. Para soluciones de cubiertas horizontales eso no supone una gran diferencia, sin embargo en fachadas el comportamiento varía considerablemente, ya que la capa exterior queda unida a la interior únicamente por medio de la lámina de PVB, que tiende a deslizarse, por lo que esta conexión no se recomienda para fachadas.

3.2.1.1.3. Anclaje de disco (disk fixing)

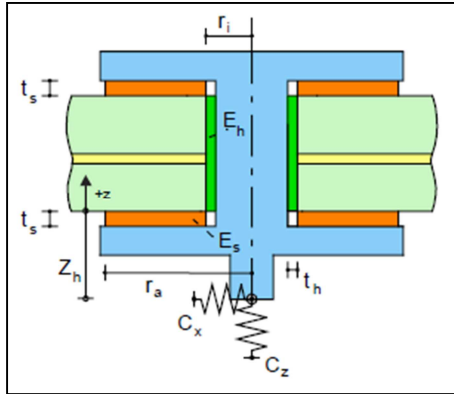


Ilustración 25: Disk fixing. Manual del programa SJ-Mepla

Su empleo está especialmente indicado para marquesinas y cubiertas que puedan estar sometidas a fuertes esfuerzos de succión.

En las marquesinas el anclaje queda invertido por tanto con esta solución se asegura una superficie amplia en la zona inferior en forma de disco sobre la que apoyar el panel de vidrio.

En las cubiertas sometidas a fuertes succiones ocurre el proceso inverso. Los pernos simples mostrados en el apartado anterior disponen de una base de cono invertida en la zona superior para evitar que el panel se salga, siendo la superficie de contacto mucho menor que en la base, por tanto, succiones importantes pueden ocasionar altas concentraciones tensionales alrededor del taladro afectando negativamente al vidrio.

3.2.1.2. Tipo pinza (clamped)

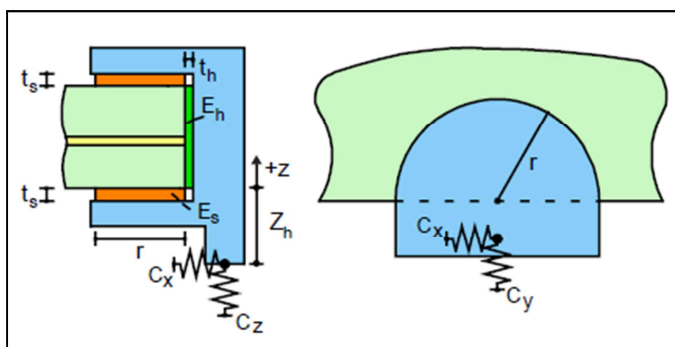


Ilustración 26: Clamped fixing. Manual del programa SJ-Mepla

Esta solución es más rentable que las anteriores por la ausencia de perforaciones y conlleva menor número de riesgos de rotura en el proceso de fabricación. Además bajo las mismas condiciones (tipo de

vidrio, carga, número y dimensión de los anclajes,

etc.) se puede considerar que la resistencia del vidrio es más alta por la ausencia de las fisuras y desperfectos causados por la perforación (ver apartado 5.1 Fisuración).

Los anclajes tipo pinza son igualmente válidos y recomendados para diseños de fachada y cubierta. Al no ser pasantes se tienen que colocar obligatoriamente en el perímetro del panel. Lo más habitual para reducir su número al mínimo es disponerlos principalmente en las esquinas, de manera que cada uno recibe la esquina de cuatro paneles.

La unión entre el vidrio y el anclaje puede quedar asegurada de dos maneras diferentes:

- Mediante esfuerzos de fricción entre estos, que impiden que el vidrio se desplace, para ello el anclaje somete al panel a fuertes esfuerzos de compresión que incrementan notablemente la resistencia al deslizamiento.
- Creando superficies de apoyo sobre las que descansa el panel.

3.2.1.3. Anclaje químico: Disco con anclaje químico (bonded disk fixing)

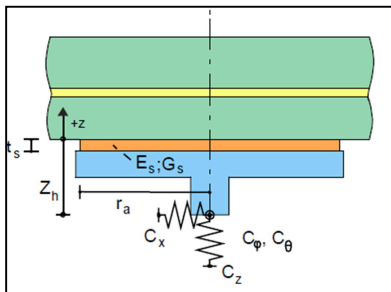


Ilustración 27: Bonded disk fixing

La ventaja de este tipo de unión es la particularidad de que no necesita ninguna perforación. Esto facilita y abarata el proceso de industrialización.

El problema radica en que la conexión depende totalmente del material adhesivo del anclaje químico.

Existen en la actualidad obras en las que se ha aplicado este método, pero siempre en soluciones como marquesinas en las que el vidrio permanece en posición horizontal. Un claro ejemplo es la marquesina de la entrada a la Ciudad Financiera del BSCH.

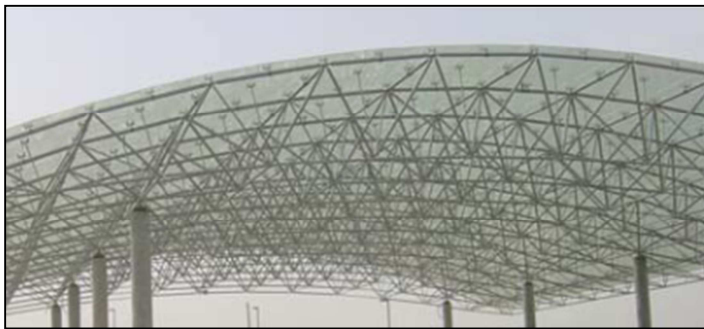


Ilustración 28: Una de las marquesinas de entrada a la Ciudad Financiera del BSCH. La fijación puntual de vidrios en Arquitectura. Bellapart. p 8

Comercialmente esta solución se conoce con el nombre de GLUEpart™ de Bellapart.

3.2.2. Juntas elásticas entre el perno y el vidrio¹⁸:

En las investigaciones de [Tehen 1997] y [DASt 2004] figuran estudios sobre diferentes materiales elásticos y cojinetes para la zona de contacto entre el acero y el vidrio. Todo ello considerando cargas paralelas al plano del panel de vidrio (*in-plane loads*).

En terminología inglesa se diferencia entre dos términos:

- “*Bushing material*” ó cojinete, que es el material que rellena el espacio entre el perno y el vidrio y no necesariamente tiene que ser elástico, puede ser por ejemplo mortero de características especiales puesto que tiene que ser muy fino y líquido para que penetre por completo en todo el volumen de relleno (ver ilustración 29, página 34).
- “*Elastic interlayer*” ó intercalario elástico: ver zona roja en la imagen 25

La diferencia principal entre los dos a efectos de ejecución consiste en que el primero depende de la holgura que se le haya dado al taladro con respecto al vidrio y el grado de alineación de las láminas que componen el vidrio laminado, mientras que en el segundo (intercalario elástico) no ocurre lo mismo, ya que la superficie de contacto entre el disco, en el anclaje tipo disco, y el vidrio es conocida, al igual que la holgura entre el disco y la superficie del vidrio.

Esto significa que en el primer caso lo ideal es un material líquido que se adapte a la forma y en el segundo caso se pueden fabricar arandelas de material elástico, como las zapatillas de los grifos, sin correr el riesgo de que no encaje.

Los materiales más comúnmente utilizados como intercalarios elásticos entre el disco de acero y el vidrio son el caucho de etileno propileno dieno ó EPDM, poliamidas (PA), policloruro de vinilo (PVC), silicona, aluminio blando ó resina epoxi. Para una información más detallada al respecto ver la tesis de [Siebert 2004]. (Consultar en la bibliografía de la tesis de Iris Maniatis, referencia 18)

- Propiedades del material de relleno para cojinetes “*bushing material*”:

El mortero normalmente empleado está compuesto por un aglomerante orgánico (*urethane methyl acrylic*) y cemento.

¹⁸ Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. p.30-31

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Material de inyección (<i>grouting material</i>)	Mortero híbrido (N/mm^2)	Resina epoxi (N/mm^2)
Resistencia a compresión	49,3 69,0 20,0	65
Después de 1 día		
Después de 28 días		
Resistencia a compresión permisible	20,0	
Resistencia a tracción	-	40
Resistencia tangencial de tracción	-	-
Resistencia a flexión del lado de las tracciones	-	18
Módulo elástico E según DIN 53452	2780	1700

Tabla 5: Resistencias del mortero híbrido y resina epoxi como junta elástica.



Ilustración 29: Procedimiento de relleno del anclaje cilíndrico con mortero híbrido. Tesis de Iris Maniatis, p 31.



La imagen de la izquierda (29) muestra los dos orificios necesarios para la inyección del material de relleno o “*bushing material*”. En el grande se aplica la inyección y el segundo evacua el aire que el material de relleno desplaza.

En la imagen de la derecha se observa como se inyecta el mortero por el orificio mayor y sale por el de menor tamaño cuando se ha llenado por completo.

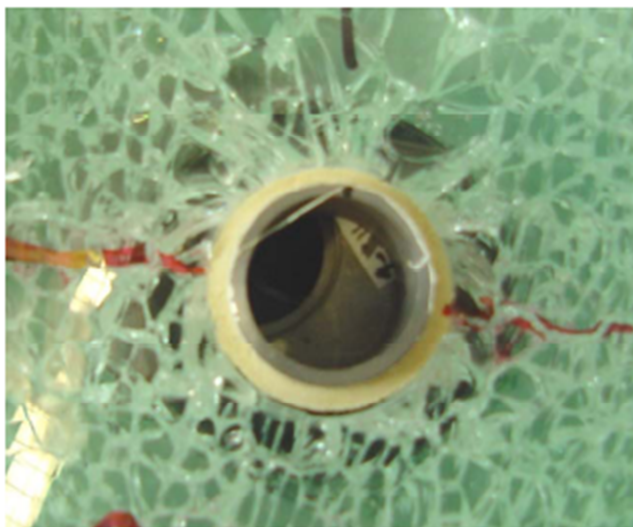


Ilustración 30: Rotura del panel de vidrio templado. Tesis de Iris Maniatis, p 31.

Hay que asegurarse de que el material de relleno ha ocupado todo el espacio, para evitar la generación de tensiones no deseadas.

Un problema que plantean algunos de los materiales que se utilizan en el mercado es la función adhesiva que desempeñan y que no es beneficiosa, ya que evita la ligera deformación del panel, manteniéndolo completamente

unido al perno y provocando un incremento de las tensiones internas.

Para un estudio más detallado al respecto se puede consultar la tesis de [Tehen 1997], donde se estudia el comportamiento de cinco materiales distintos. (Consultar en la bibliografía de la tesis de Iris Maniatis, referencia 18)

Nylon tipo PA 6:

Principales características: Resistencia a la fatiga y al desgaste

Propiedades	NYLON PA 6
Densidad	1,13 g/cm ³
Resistencia a tracción según DIN EN ISO 527-1,-2	70-80 N/mm ²
Módulo elástico de tracción E, según DIN EN ISO 527-1	1400-3000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0,35

Tabla 6: Propiedades del Nylon para su uso como junta elástica.

3.2.3. Tolerancias

Para el dimensionado y los posibles errores en la fabricación de los paneles y en la ejecución de los taladros hay que tener en cuenta las normas DIN 1249-12, DIN EN 572-2, DIN EN 12150-1 y DIN EN 1863-1.

Límites de los taladros y tolerancias:

Tipo de vidrio	Diámetro nominal Ø (mm)	Tolerancia (mm)	Fuente
Vidrio templado y termoendurecido	$4 \leq \varnothing \leq 20$	$\pm 1,0$	DIN 1249-12
	$20 < \varnothing \leq 100$	$\pm 2,0$	DIN EN 12150-1
	$100 < \varnothing$	Lo da el fabricante	DIN EN 1863-1

Tabla 7: Relación entre el límite del diámetro de los taladros y la máxima tolerancia

Tolerancias en el alineamiento del vidrio laminado (*LSG-laminated safety glass*):

Valor nominal de A y B (mm)	Tolerancia (mm)
$A, B \leq 1000$	2,0
$1000 < A, B \leq 2000$	3,0
$2000 < A, B \leq 4000$	4,0
$A, B > 4000$	6,0

Tabla 8: Tolerancias en el alineamiento del vidrio laminado

En los taladros un mal alineamiento de los paneles del vidrio laminado puede tener consecuencias muy perjudiciales, por ser causante de la aparición de tensiones internas no deseadas. Para evitar esto el diámetro del taladro tiene

que ser un par de milímetros mayor que el diámetro del perno conector. En los pernos tipo disco que requieren un taladro cilíndrico en el vidrio, el hecho de que el vidrio laminado no esté perfectamente alineado no supone un problema importante ya que el espacio libre entre el perno y el vidrio se rellena de un material elástico que absorbe las posibles desviaciones. En el caso de los pernos enrasados con taladro troncocónico (*countersunk*), a pesar de que también tienen material elástico entre el perno y el vidrio, es imprescindible que el vidrio laminado esté perfectamente alineado ya que por la forma del taladro y por la transmisión de cargas solo por contacto, es casi imposible conseguir que el material elástico absorba por completo las tensiones que originan estos desperfectos.

3.2.4. Introducción al método de cálculo mediante elementos finitos FEM (Finite Element Method):

3.2.4.1. Introducción:

Este tipo de aplicación informática ha tenido desde su origen una gran aceptación en el sector de la ingeniería por el alto potencial y facilidad que ofrece a la hora de analizar, estudiar y calcular complejas estructuras de todo tipo.

Algunos de estos programas como ABAQUS, Algor, ANSYS, etc. requieren un conocimiento muy detallado en su manejo, ya que el alto número de parámetros, posibilidades a barajar y complejidad de las simulaciones, hace que la organización y empleo de las herramientas requiera una formación previa del software, para poder conocer adecuadamente su funcionamiento.

Existe una variante de estos programas, en los que la aplicación es mucho más concreta y por tanto su empleo resulta mucho más intuitivo y manejable, que suele ser la principal problemática que plantean.

En un comienzo este proyecto se centro en el empleo de varias aplicaciones como el ABAQUS o Algor para el desarrollo de las simulaciones y su posterior comparación, pero al ser programas de pago es complicado conseguir versiones beta completas que puedan ser útiles para el propósito de este proyecto.

Se propone realizar las simulaciones con el programa Straus7, del cual se dispone de licencias de uso en la universidad de Arquitectura Técnica de Madrid-UPM y se posee un nivel de uso medio, que capacita la elaboración de

las simulaciones. Además se cuenta con el apoyo del profesor Jaime Santa Cruz Astorqui, experto en programas de simulación por elementos finitos y usuario habitual de Straus7.

Una variante de los programas de simulación que también incentivó a seguir por esta línea de trabajo es el software SJ Mepla. Un programa igualmente de pago que cuenta con una versión de prueba con el paquete de opciones completo, a excepción de la muestra de los resultados finales. Este programa está especializado en el cálculo de paneles de vidrio con anclaje puntual, por lo tanto ofrece, tanto información relativa al comportamiento del panel en general como del anclaje puntual en particular.

Al ser una aplicación organizada de manera sencilla e intuitiva, permite con unos conocimientos básicos en materia de vidrios y programas tipo FEM, diseñar y calcular paneles para fachadas, cubiertas, suelos, barandillas, etc. con una amplia variedad en los tipos de anclaje, tipos de vidrio e hipótesis de carga.

3.2.4.2. Conceptos básicos sobre FEM (Finite Element Method):

El desarrollo de este apartado está apoyado en el trabajo de Fin de Máster: J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006) porque expresa de forma clara los conceptos generales de este método, haciendo referencia a la aplicación que se le va a dar en este proyecto. También se ha empleado el manual elaborado por el profesor Jaime Santa Cruz, profesor de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid de la UPM.

3.2.4.2.1. Construcción de la geometría:

Consiste en construir, la geometría del elemento que se va a mallar. Los programas normalmente proporcionan herramientas de dibujo, sin embargo suelen ser de difícil manejo ya que el dibujo no es la finalidad, por tanto a menos que la geometría sea básica, se recomienda realizarla en programas de dibujo compatibles como Autocad y después exportar el archivo. La geometría que se dibuja en primera instancia no siempre tiene que ser la del modelo final a simular. Es un apoyo que facilita el proceso de mallado. Para objetos como muros con huecos puede resultar más cómodo dibujar el alzado en 2D y después de realizar un mallado con elementos bidimensionales “*plate*”, extruir para generar elementos tridimensionales “*brick*” que forman el volumen del muro.

3.2.4.2.2. Mallado:

Todos los programas FEM parten de la misma base, es decir, elementos simples que componen la geometría del elemento a simular. Estos son:

Elementos lineales (*beam*, que significa viga en inglés): Constan de dos nodos extremos

Elementos bidimensionales (*plates*, que significa placa en inglés): Constan de 3 nodos si son triángulos y 4 si son cuadrados en sus vértices.

Elementos tridimensionales (*brick*, que significa ladrillo en inglés): Constan de 4 nodos los tetraedros, 5 nodos los piramidales, 6 nodos las cuñas y 8 nodos los hexaedros.

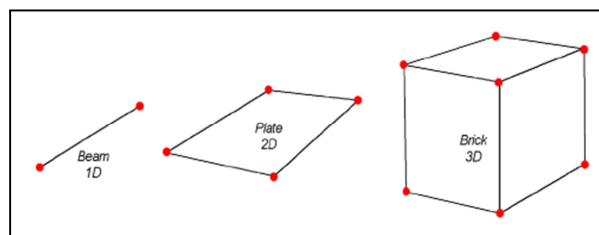


Ilustración 31: Elementos básicos de un mallado.

Elementos Beam/1D, Plante/2D y Brick/3D

Profesor Jaime Santa Cruz Astorqui. EU Arquitectura

Técnica-UPM. La simulación por elementos finitos.

A partir de estos elementos se construye toda la geometría del objeto final. No hay que confundir vértice con nodo. Aunque los dos sean puntos que en la mayoría de los casos coinciden en la misma posición espacial, un vértice es un elemento geométrico, mientras que los nodos son los puntos, resultado final del mayado que simula el comportamiento de tensión deformación del material de estudio. Es decir mientras que es vértice (*vertex*) es un elemento puramente geométrico, los nodos guardan información que les relaciona entre sí de manera que se alejarán o separarán los unos de los otros en función de las solicitaciones que les son aplicados en función de las propiedades que se les haya proporcionado en la simulación para asemejarse al comportamiento de un material u otro.

Un detalle importante a la hora de realizar simulaciones, es que no todas las zonas tienen el mismo interés de estudio. Por ejemplo el interés de este proyecto se centra en la distribución de las tensiones alrededor de las

perforaciones. Por tanto la malla debe tener más concentración de nodos en esta zona. El tiempo que requieren estos programas para calcular los resultados en ocasiones es largo, por lo que para optimizar tanto resultados como tiempo conviene hacer un estudio previo de las zonas de interés.

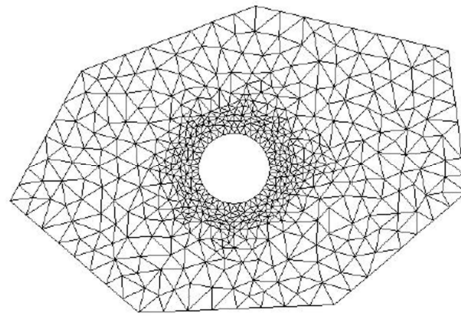


Ilustración 32: Mallado con un hueco circular. La malla está refinada cerca del hueco. J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 29

No solo la concentración de nodos sino también el tipo de mallado conlleva ligeras diferencias en los resultados.

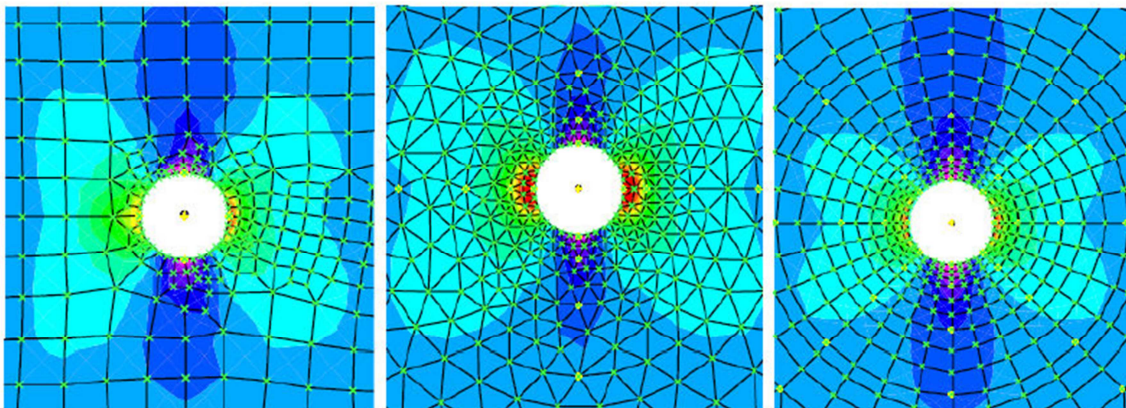


Ilustración 33: Comparación de mallados. The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p. 13

Según el estudio realizado por Mauro Overend e Iris Maniatis¹⁹ se aprecia que bajo las mismas hipótesis de carga, la distribución de tensiones varía ligeramente en función del tipo de mallado. La carga a la que se ha sometido el panel general una distribución teóricamente simétrica respecto a los ejes vertical y horizontal, sin embargo la malla de la izquierda, elaborada manualmente mediante cuadriláteros y la central construida automáticamente con elementos “plate” triangulares proporcionan una distribución ligeramente asimétrica. Además la malla con elementos triangulares es algo más rígida que

¹⁹ The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections

las otras dos. Esto ocurre siempre con los elementos triangulares, ya que geométricamente un triángulo es indeformable, mientras que un cuadrado no.

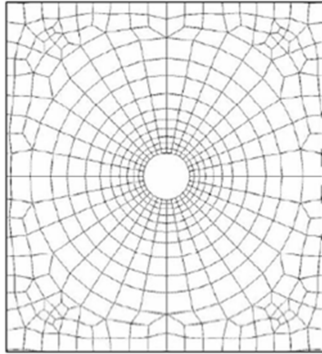


Ilustración 34: mallado alrededor del hueco. The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p. 13

La malla de la derecha de la imagen 33, se ha realizado de forma manual y es la misma que la que aparece en la ilustración 34. Según el estudio realizado por estos autores, tanto el número como la geometría de los elementos radiales tienen una notable influencia sobre el resultado final.

Se ha determinado que un mallado con 32 radios (ver ilustración 34) y una relación de 1:1.5 en la distancia entre circunferencias concéntricas de menor a mayor ofrece resultados adecuados. Por esta razón se utilizará este tipo de mallado en todos los modelos a analizar.

3.2.4.2.3. Restricciones:

Las restricciones son las limitaciones al movimiento que hacen que el modelo sea lo más similar a la realidad. A modo de ejemplo, cualquier elemento apoyado en el suelo debe tener una restricción en la componente vertical (Y) de manera que no pueda desplazarse hacia abajo por lo tanto $y=0$, a menos que se quiera simular un asiento. En el campo de los paneles de vidrio con anclaje puntual ocurre lo mismo. Las condiciones de movimiento de los anclajes se definen en este apartado, por lo tanto habrá que dejar constancia de las restricciones para determinar si un anclaje es articulado o rígido, y también las de posicionamiento para controlar el movimiento respecto la posición original.

3.2.4.2.4. Propiedades de los materiales:

En los programas tipo ABAQUS, ANSYS y Straus7 en los que se trabaja con una amplia variedad de materiales, como el acero, hormigón, mortero, etc. es imprescindible designar a cada elemento las propiedades del material que lo compone. En ocasiones estos programas disponen de paquetes integrados que facilitan esta labor ya que incluyen todas estas características. En caso contrario, como puede ocurrir en materiales nuevos o poco estandarizados como morteros especiales con polímeros para aplicaciones muy concretas es necesario conocer todos los datos técnicos que principalmente son el módulo de elasticidad, el coeficiente de poisson, la densidad y la introducción de gráficas de tensión-deformación a tracción y compresión.

3.2.4.2.5. Hipótesis de carga:

Por último, queda por aplicar los modelos de carga que se quieran estudiar. Una aportación de gran interés en este sentido que ofrecen estos programas informáticos es la posibilidad de establecer un historial de carga. Es decir si simulamos una carga uniformemente repartida en una viga apoyada-apoyada, en la realidad la carga final no se aplica de golpe, sino progresivamente. Esta capacidad de introducir fases de carga en el modelo ayuda a que la simulación se aproxime más a la realidad.

En los paneles de vidrio los casos más comunes son:

- Carga lineal en el borde superior de un panel para simular una barandilla
- Carga uniformemente repartida para la simulación de viento en fachadas
- Carga puntual para simular golpes por accidentes, o actos de vandalismo
- Carga uniformemente repartida para simular nieve en cubiertas
- Peso propio en fachada y cubierta

Una vez se han insertado todos los parámetros correspondientes a los puntos anteriores solo queda comenzar la simulación, para estudiar y analizar los resultados obtenidos.

3.2.4.3. Pasos a seguir en la simulación de paneles de vidrio con anclajes puntuales utilizando el programa SJ-Mepla (<http://www.mepla.eu/en/>)

Para explicar brevemente el uso de esta aplicación, se ha utilizado como ejemplo la barandilla que se ha empleado en la comparativa con el programa ClearSight desarrollada en el apartado 7.3

- Geometría:

Introducción de las coordenadas de los vértices en sentido anti horario.

New item Delete item Delete all items

Edge	X [mm]	Y [mm]	X _m	Y _m	Rotation
	0	0			
1	0	0			
2	2000	0			
3	2000	1200			
4	0	1200			

100 mm element size Correction

The diagram shows a green polygon with vertices numbered 1 to 6 in a counter-clockwise direction. Vertex 1 is at the bottom-left, 2 is at the bottom-right, 3 is at the top-right, 4 is at the top-right with a semi-circular cutout, 5 is at the top-right, and 6 is at the top-left. A coordinate system (x, y) is shown at the bottom-left.

Ilustración 35: Introducción de los datos geométricos

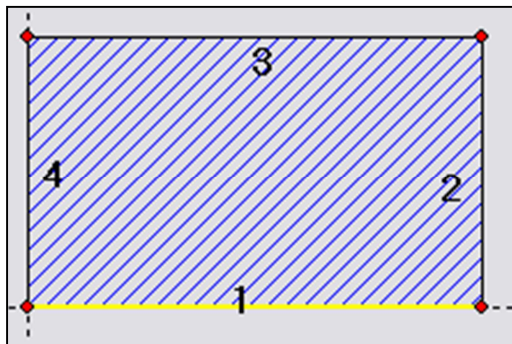


Ilustración 36: Detalle de la geometría de la barandilla

En el recuadro inferior izquierdo de la ilustración 35 se especifica la dimensión máxima de cada segmento del mallado. Cuanto menor sea más exacto será el resultado, sin embargo valores comprendidos entre 10 y 30 conllevan periodos de cálculo muy elevados.

Capas:

Package: 1 from 1 New item Delete item

Layer	Material	E	ν	t	ρ	α_T	ΔT
	Glass, heat toughened	70000	0.23	8	2.4e-9	1.e-5	0
3	Glass, heat toughened	70000	0.23	8	2.4e-9	1.e-5	0
2	PVB long time loading	9	0.43	0.76	1.5e-9	8.e-5	0
1	Glass, heat toughened	78000	0.23	8	2.4e-9	1.e-5	0

Ilustración 37: Propiedades de los materiales

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

En este ejemplo se han empleado dos láminas de vidrio termoendurecido (porque no contempla el uso del vidrio templado) y una lámina de PVB para simular un vidrio laminado.

value	description	units
material	choice from database	-
E	young's modulus	[N/mm ²]
ν	poisson's ratio	-
t	layer thickness	[mm]
ρ	mass density of the layer	[to/mm ³]
α_T	thermal expansion coefficient	[1/K]
ΔT	temperature difference	[K]

Ilustración 38: Unidades de medida

El programa contiene una tabla de materiales en la que se incluyen por defecto sus propiedades, que pueden ser modificadas después. Los únicos valores a introducir son el espesor “t” (mm) y el “ ΔT ” (K)

Anclajes:

The screenshot shows the 'Glass fixing' tab in the software. It contains two main tables for defining anchor properties.

Kind of fixing:

Manufacturer - product*	Type	r_i	r_a	E_s	E_h	t_s	t_h	h_k	r_k
DiskFixing	2	30.	50.	60.	500.	3.	2.		
DiskFixing	2	30.	50.	60.	500.	3.	2.		

Position of fixing:

*Reference	X [mm]	Y [mm]	Z_h	C_x	C_y	C_z	C_ϕ	C_θ	Type
DiskFixing	1800	200		1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	0
DiskFixing	1800	200		1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	0
DiskFixing	200	200	0	1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	1.e6	0

Contact approaches (tolerance value):

- ☐ for the bush: 0.001 mm
- ☐ for the disk layer: 0.001 mm

Degree of freedom for rotat

☐ $\phi \neq 0$

Load transmission at the borehole rim:

- ☒ only the countersunk head touches the glass chamfer (type 1, 8, 9)
- ☐ only glass layer touches the bush (type 2, 10)

A diagram on the right shows the cross-section of the anchor assembly with various parameters labeled: r_i , r_a , E_s , E_h , t_s , t_h , h_k , r_k , Z_h , C_x , C_y , C_z , C_ϕ , C_θ , H_{t1} , H_{t2} , Z_1 , Z_2 .

Ilustración 39: Introducción de las características de los anclajes

En el cuadro superior (ver ilustración 39) se escogen los tipos de anclaje de interés, que incluyen las medidas generales de su geometría (diámetro interior, exterior, etc.) y pueden modificarse si se desea.

La zona inferior recoge las coordenadas donde se coloca cada anclaje, además de las restricciones de movimiento, que se expresa mediante la rigidez de cada eje. De esta manera el cero indica el movimiento libre del eje y el valor 1.e6 (1.000.000) indica que el eje es totalmente rígido.



Ilustración 40: Barandilla con dos anclajes

Hipótesis de cargas:

En este caso se ha introducido únicamente una carga lineal, por tratarse de una barandilla. Todas las diferentes opciones de carga aparecen en las pestañas de la zona superior, como se muestra en la ilustración:

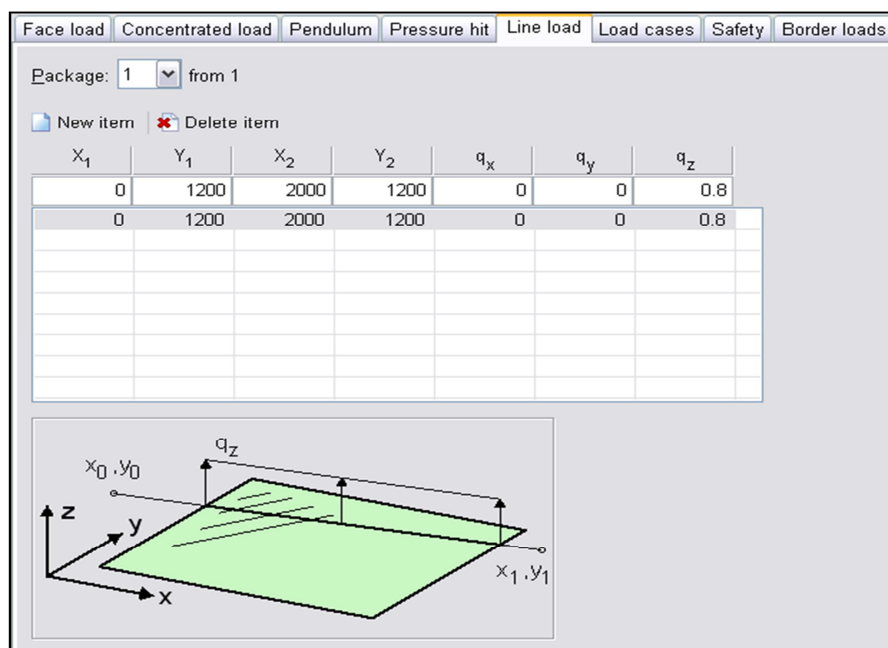


Ilustración 41: Carga lineal

Las distancias se miden en mm y en este caso la carga al ser lineal en N/mm

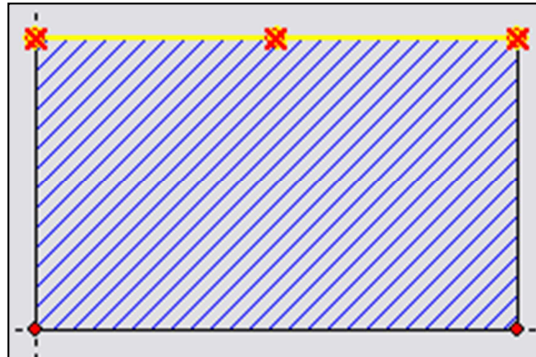


Ilustración 42: Barandilla sometida a una carga lineal igual a 0.8 N/mm

La línea amarilla indica la región donde se aplica la carga.

Opciones de cálculo:

Calculation approach:

☐ geometrically non-linear

☒ linear calculation

Convergence settings:

0.1 N force tolerance

☐ Disable automatic

☐ Apply loads in how many steps:

3

Local result outputs:

Package: 1 from 1

X [mm] Y [mm]

X [mm]	Y [mm]

Solver:

☐ In-Core, IC

☐ Out-of-Core, OOC

☒ IC <2GB or OOC >2GB

Stress results (max. values):

☒ Max. principal stress

☐ Min. principal stress

☐ Von Mises stress

Reaction forces:

☐ Spacer

☐ Elastic line supports

☐ Elastic edge supports

☐ Springs

☐ Beams

☒ Point fixings

☐ Interspace of double-glazing

☐ Bonded edges

Output:

☒ calculate formed volume

Messages:

Español

Protocol:

Español

Ilustración 43: Opciones relativas al cálculo

- “*Calculation approach*”: Sirve para indicar si el cálculo es lineal o no lineal. La opción no lineal se emplea cuando el comportamiento del material no sigue la ley de Hook. En los paneles de vidrio se aconseja esta

alternativa cuando se prevén deformaciones muy pronunciadas en la dirección perpendicular al plano del panel.

- “Convergence settings”:
 - “Disable automatic”: cuando la casilla no está marcada, sirve para simplificar el proceso de cálculo. Si se utiliza doble acristalamiento o se prevén deformaciones transversales importantes en el panel hay que activar la casilla, para que el programa no simplifique los cálculos.
- “Stress results” y “Reaction forces”: abarcan una serie de parámetros que solo se calcularán si se marca la casilla correspondiente, de esta manera se acelera el proceso de cálculo.
- “Output”:
 - “Calculate formed volumen”: esta opción se utiliza para que el panel adopte en la representación gráfica la deformación correspondiente a la carga sometida. Por tanto si no se marca no se percibirá ninguna deformación en el resultado.

Representación gráfica:

Las líneas dibujan el mallado del panel de vidrio, en el que el número de nodos es más concentrado alrededor de los anclajes, por ser las zonas de interés.

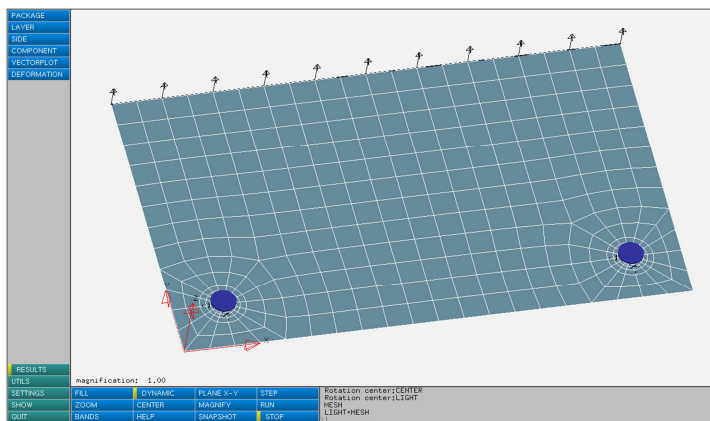


Ilustración 45: Mallado de la barandilla.
Producción propia

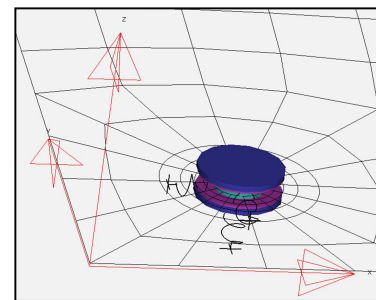


Ilustración 44: detalle de perno de disco. Producción propia

Ejemplos:

La versión de prueba de este programa no permite ver los resultados obtenidos, no obstante en la página web se pueden ver algunos ejemplos que se proponen de diferentes aplicaciones con paneles de vidrio:

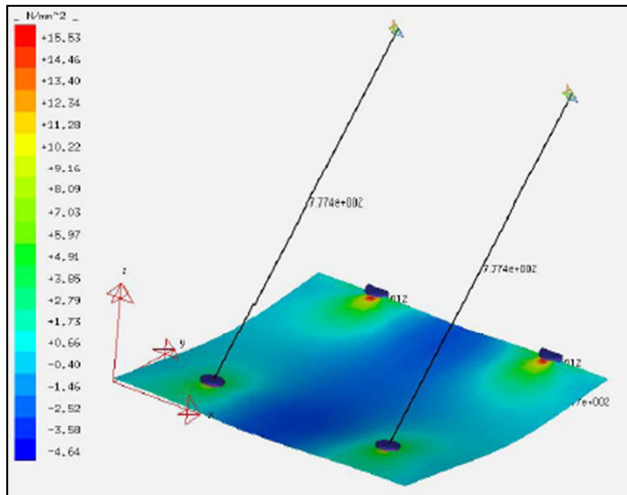


Ilustración 46: Detalle de marquesina (canopy)

En la ilustración 46 el panel está anclado a cuatro puntos, dos mediante pernos pasantes tipo disco y dos con anclajes tipo pinza (clamped fixing)

La barra de colores de la izquierda indica el valor numérico de la tensión a la que se ve sometido el panel en cada sector.

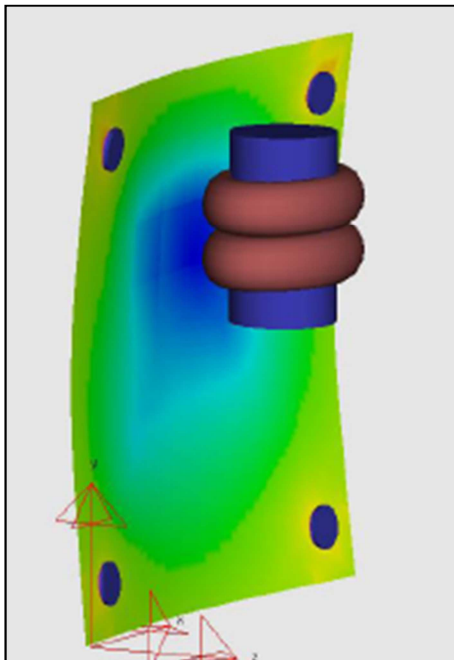


Ilustración 47: Simulación de resistencia a impacto según EN 12600

Ejemplo de una simulación de un ensayo normalizado de resistencia a impacto, mediante un péndulo en un panel de vidrio con cuatro anclajes puntuales.

EN 12600: Ensayo con péndulo para describir el comportamiento del vidrio en caso de impacto.

3.2.4.4. Criterios de diseño en la simulación de paneles de vidrio con anclajes puntuales utilizando el programa Straus7:

En el manual elaborado por el Profesor Jaime Santacruz de la EUATM, se desarrolla con todo detalle el proceso a seguir para realizar simulaciones de todo tipo. Por tanto en este apartado solo se van a comentar los criterios concretos considerados para que las simulaciones sean eficaces.

a) Simulaciones en las que la distribución de las cargas es homogénea en toda la sección del panel:

Son ejemplos de este caso los paneles sometidos solicitados por su peso propio, o cargas paralelas al plano del panel, que además están unidos a la estructura portante mediante anclajes cilíndricos.

Para la simulación de estos paneles se utilizarán elementos bidimensionales “plate”, para reducir el tiempo de cálculo. (Ver apartado 7.5)

b) Simulaciones en las que la distribución de las cargas varían en toda la sección del panel:

Son ejemplos de este caso los paneles sometidos a cargas perpendiculares al plano del panel, como viento en fachada, o peso propio en cubiertas y también todos aquellos paneles unidos a la estructura portante mediante anclajes con perno avellanado (con cabeza troncocónica). (Ver apartados 7.3 y 7.4)

Para la simulación de estos paneles se utilizarán elementos tridimensionales “brick”, para representar fielmente lo que ocurre a lo largo de la sección del panel, especialmente alrededor del taladro.

Una diferencia representativa con respecto al mallado con elementos “plate” es la necesidad de reducir las dimensiones de los “brick”, ya que el espesor del panel es reducido y para que los resultados sean realistas es importante que haya cierta proporcionalidad entre todas las dimensiones de cada elemento tridimensional.

c) Simetría:

Esta herramienta es especialmente útil para simplificar los casos que tengan un alto número de nodos, por lo tanto se utilizará la simetría en los paneles representados con elementos tridimensionales y así reducir el tiempo de cálculo.

- I. Simetría de 1 eje: barandillas, que no tenga anclaje central, para evitar divisiones de los pernos. (Ver apartado 7.3)
- II. Simetría de 2 ejes: paneles de cubierta o fachada con 4 anclajes, uno en cada esquina.
- III. Simetría de 2 ejes en paneles, sin pernos, en los que se estudia la influencia de la deformación del hueco en la aparición de tensiones internas no deseadas. Ambos ejes de simetría pasan por el centro geométrico del taladro. En estos casos el taladro se encuentra en el centro del panel, por lo que la distribución de las cargas es simétrica respecto a ambos ejes. En los taladros practicados en barandillas y paneles de fachada o cubierta no puede hacerse esto.

d) Mallado manual y automático:

- I. Mallado manual²⁰: se ha dibujado, en torno a todos los taladros de cada panel, una malla a partir de elementos radiales y circunferencias concéntricas, para mejorar la calidad de los resultados. (Ver anexo I, p.7)
- II. Mallado automático: el resto del panel se mallará automáticamente con elementos preferentemente cuadrangulares, ya que los triangulares generan una rigidez adicional, por ser elementos indeformables, al contrario que los cuadrados.

Hay que tener en cuenta que el panel es de vidrio laminado de dos láminas de 8mm y una intermedia de PVB de 0,76mm en todos los ejemplos. Esto significa que para el mallado hay que generar dos láminas de elementos “brick” como mínimo (una por lámina de vidrio) y una capa intermedia de elementos “plate” (para el PVB)

Para que los nodos coincidan a lo largo de la sección se mallará una de las superficies con elementos “plate”, para después extruirlos formando elementos “brick”. (Ver anexo I, p. 7,10, 14, 17 y 18)

e) Juntas elásticas mediante “point contact beam”:

“Este elemento se utiliza para simular la unión entre dos superficies, uniendo los nodos de ambos”²¹:

“Normal contact”: solo ofrece resistencia a compresión, por lo que sirve para juntas prefabricadas que no se adhieren ni al panel de vidrio ni al perno.

²⁰ Iris Maniatis. The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. Apartado 4.2.1 Mesh Geometry and Element Types

²¹ Jaime Santacruz. Manual de usuario de Straus7. p. 17

“Tension contact”: funciona igual que el anterior, pero también ofrece resistencia a tracción, por lo que se utiliza para representar juntas de material elástico que se adhieren a las superficies que separa, como el mortero con polímeros (ver *“apartado 3.2.2: Juntas elásticas entre el perno y el vidrio, páginas 33-36”*)

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS A SEGUIR

Al objeto de acotar el campo de investigación se han fijado/ determinado un caso concreto para el análisis del comportamiento tensional del vidrio alrededor del anclaje.

Se han establecido una serie de condiciones comunes a todos los casos de estudio.

El tipo de vidrio a analizar en todos los casos será laminado, ya que su uso es el más extendido en la práctica por las condiciones que ofrece en materia de seguridad. Por tanto los paneles de vidrio recocido, termoendurecido y templado que no formen parte de un vidrio laminado quedan excluidos del presente estudio. De la misma manera los dobles acristalamientos no se consideran en el presente estudio ya que conforma una estructura de mayor complejidad, que además tiene la necesidad de estudiar la influencia de las expansiones del gas interior. Por otro lado sus características particulares hacen complicada la comparación con el resto de modelos.

El principal área de interés es el comportamiento tensional del panel de vidrio laminado alrededor del anclaje puntual. Para facilitar el proceso de comparación sobre la influencia de los diferentes tipos de anclaje en la distribución de las tensiones alrededor del anclaje, se utilizarán los mismos parámetros en todos los paneles a excepción del valor de las cargas, la posición del perno en el panel y el número de pernos.

Parámetros comunes

- Tipo de vidrio
- Espesor
- Dimensiones
 - Longitud, altura y espesor de las capas del vidrio laminado
 - Diámetro de las aberturas en los paneles y la posición relativa respecto del panel
 - Dimensiones de los anclajes empleados

Hipótesis de carga

- Hipótesis 1: Panel para balaustrada (barandilla)
- Hipótesis 2: Panel en posición vertical (fachada)

5. ESTUDIO POR AUTORES

5.1. Estudio por autores sobre la Fisuración:

Teóricamente la resistencia a tracción del vidrio <annealed> común compuesto por sílice, sodio y caliza alcanza resistencias de 32GPa, sin embargo la capacidad máxima que en la realidad llega a soportar es mucho menor. La razón de esta discrepancia radica en la presencia de imperfecciones en forma de ralladuras y microfisuras en la superficie de los paneles de vidrio. Este hecho fue observado por primera vez por Griffith²² en 1920

5.1.1. Mecánica de fractura lineal elástica. Criterio de Griffith:

“En un cuerpo sometido a una condición arbitraria de carga, que se comporte de manera totalmente elástica y que contenga una fisura, la propagación de la fisura comenzará cuando la disminución de energía potencial elástica que experimente el cuerpo por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance del vértice de la fisura, sea igual o mayor al incremento de energía superficial por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance de la fisura que se producirá como consecuencia de la creación de las nuevas superficies debidas a dicha propagación”²³.

Esto significa que la fisura se propagará si la energía elástica acumulada es igual o mayor a la cantidad de trabajo necesario para que se produzca un incremento en la longitud de la fisura. Por tanto:

Caso 1: $\frac{dU}{dx} < \frac{dW}{da}$; No hay propagación

Caso 2: $\frac{dU}{dx} = \frac{dW}{da}$; Existe propagación estable

Caso 3: $\frac{dU}{dx} > \frac{dW}{da}$; Propagación inestable

U = Energía elástica acumulada

W = Trabajo para crecimiento

²² Griffith A. A.: “The phenomena of rupture and flow of solids”, Theoret. Trans. Royal Society of London, 1920, 221, p163-179.

²³ Mecánica de Fractura Lineal Elástica.p-1.

http://materias.fi.uba.ar/6716/Mecanica%20de%20fractura%20lineal%20-%20elastica_1.pdf

Griffith²⁴ basándose en la primera ley de la termodinámica, que establece que en un sistema cerrado la energía se conserva, realiza un ensayo utilizando como probetas dos láminas delgadas de vidrio de sílice por ser especialmente frágil. Las dos probetas son cargadas hasta obtener el mismo desplazamiento. La energía elástica almacenada en la probeta fisurada es menor que la de la probeta no fisurada. Griffith utilizó esta diferencia para desarrollar la teoría de la rotura frágil.

5.1.2. Modos de sollicitación. Criterio de Irwin de la Intensidad de Tensiones. Tenacidad a la fractura²⁵.

Modos de fractura:

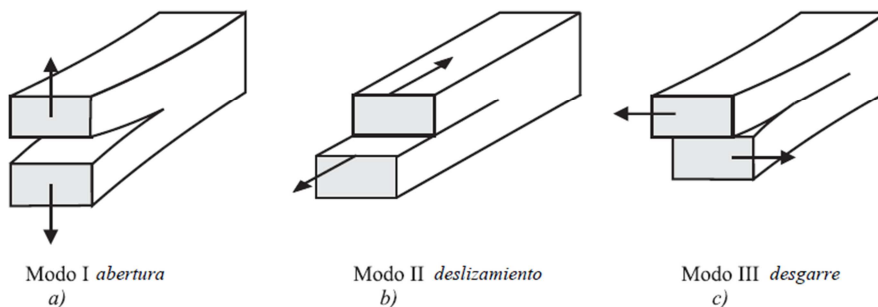


Ilustración 48: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EM03603M.pdf>

El Modo I es el caso que más fácilmente puede darse en los paneles de vidrio, debido a fenómenos de pandeo en cubiertas, o en fachadas por la acción del viento.

Alrededor del taladro que se practica en los paneles para los anclajes pasantes, debido a la acción mecánica, quedan desperfectos en la superficie en forma de microfisuras, que restan resistencia al elemento original.

Este autor se centró en resolver los problemas de las tensiones y deformaciones en el vértice de la fisura. (Ver ilustración 49)

²⁴ Conceptos básicos de la mecánica de fracturas. Abril-2010.p-3.

<http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/catedras/archivos/Mecanica%20de%20Fractura%202010rev01.pdf>

²⁵ Mecánica de Fractura Lineal Elástica.p-5.

http://materias.fi.uba.ar/6716/Mecanica%20de%20fractura%20lineal%20-%20elastica_1.pdf

The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p.3. <http://www->

[g.eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatis_%20paper.pdf](http://www-eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatis_%20paper.pdf)

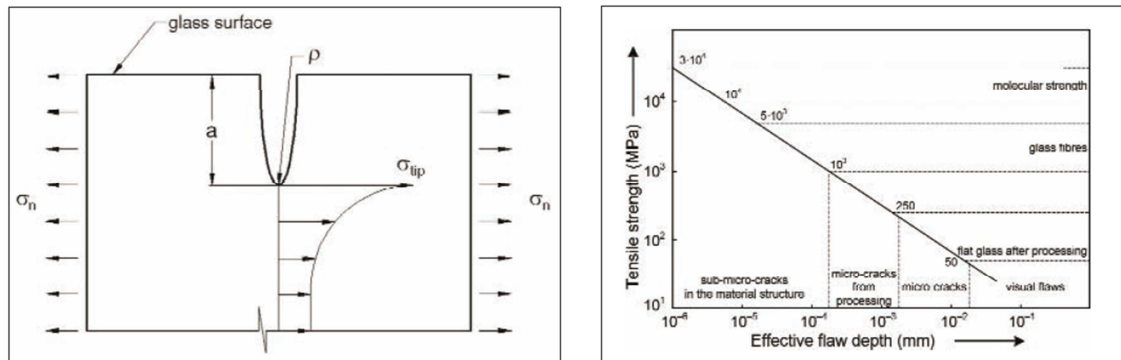


Ilustración 49: Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 20

A través de los cálculos que desarrolla Irwin se puede conocer la resistencia a rotura del vidrio para las fisuras existentes.

La imagen 49 de la izquierda detalla la forma en que se concentran las tensiones justo en el vértice de la grieta. Viendo esta imagen se llega a la conclusión de que ante una misma carga exterior, la tensión en el vértice de la grieta irá aumentando a medida que esta sea más profunda ($>a$), por lo que una vez que la tensión en el vértice (σ_{tip}) supere el trabajo para crecimiento (W) la grieta se propagará de forma incontrolada o inestable, contribuyendo al colapso de la estructura.

La tensión en el vértice (σ_{tip}) se calcula mediante la expresión:

$$\sigma_{tip} \approx K_{shape} \sigma_n (a/\rho)^{1/2}$$

Donde “ σ_{tip} ” es la tensión en el vértice de la fisura, “ K_{shape} ” es un coeficiente que depende de la geometría de la fisura ($K_{shape} = 2$, para elipses estrechas), “ σ_n ” es la tensión nominal perpendicular a la fisura, “ a ” es la profundidad de la fisura y “ ρ ” es el radio de curvatura del vértice de la fisura.

Analizando la fórmula anterior se observa que cuanto mayor son la tensión perpendicular a la fisura que genera solicitaciones de tracción y la profundidad de la fisura, mayor es la tensión en el vértice. De la misma manera cuanto más agudo es el ángulo del vértice, es decir, cuanto menor es el radio de curvatura, tanto mayor es la tensión en el vértice.

Esta situación puede describirse también con el coeficiente de intensidad de tensión (*stress intensity factor*) K , cuyo valor crítico es K_{IC} . El coeficiente K , para el modo I de apertura en una fisura es:

$K_I = \sigma_n Y (\pi a)^{1/2}$, cuando $K_I \geq K_{IC}$, la fisura crece rápidamente.

Donde Y es un coeficiente que depende de la geometría de la fisura.

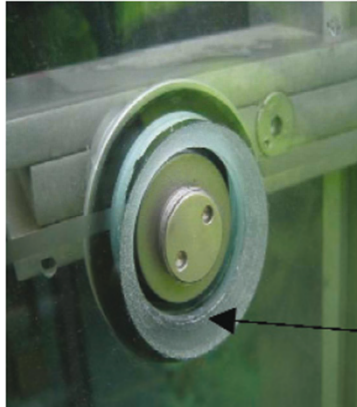


Ilustración 50: Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 22

La imagen 49 de la derecha muestra un gráfico en el que en el eje de las ordenadas (Y) se refleja la resistencia a tracción en MPa y en el eje de las abscisas (X) la profundidad de las fisuras en mm. Como conclusión se extrae que la profundidad de la fisura es inversamente proporcional a la resistencia a tracción de los paneles de vidrio.

Fisuras microscópicas debido al proceso de taladrado

5.1.3. Criterio de fractura²⁶ según el Eurocódigo:

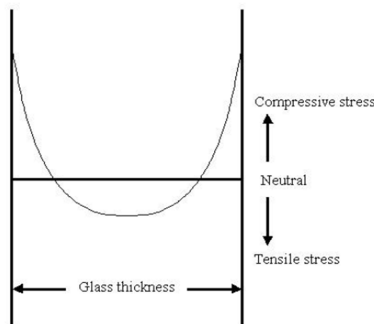


Ilustración 51: J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 6

El Eurocódigo²⁷ sobre diseño de estructuras de vidrio sugiere que los vidrios de seguridad con cristal templado tengan una resistencia a tracción de 50MPa.

Se entiende que la zona crítica es aquella donde se produce el mayor esfuerzo de tracción (por esfuerzos de flexión o axil). El estudio de esta zona es crítico para determinar la capacidad portante del panel sin que sobrepase el límite de rotura del material.

Las tensiones internas que con el templado se generan en el vidrio, se emplea como margen de seguridad y no se consideran en los cálculos estructurales.

²⁶ J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006).

²⁷ Sedlacek, G., (2005) Proposal for the content of new Eurocode on design of glass structures. Part 1: Basis of design - design of glass panes.

6. ESTUDIO POR TÉCNICAS EMPLEADAS

6.1. Diseño de anclajes puntuales en vidrio laminado mediante el coeficiente de concentración de tensiones²⁸ (DESIGNING BOLT FIXED LAMINATED GLASS WITH STRESS CONCENTRATION FACTORS)

La investigación que se realiza en este artículo trata de determinar un coeficiente de concentración de tensiones (*“stress concentration factor”*), para una barandilla de vidrio con un anclaje en cada vértice del panel (2+2). Con ello lo que se pretende conseguir es un método simplificado mediante el cual a través de una serie de gráficas y formulas sencillas se pueda determinar las máximas tensiones del panel de vidrio para combinaciones arbitrarias de los parámetros geométricos involucrados (dimensiones de la superficie, posición y tamaño de los anclajes, etc.) y así evitando el empleo casi obligatorio de programas de elementos finitos, para obtener resultados similares.

Coeficiente de concentración de tensiones “ α ”²⁹

Puesto que calcular “ α ” analíticamente es muy complicado, la técnica más común que se emplea son las gráficas. “ α ” es un parámetro que relaciona la tensión nominal, σ_{nom} , con la máxima tensión a tracción que siempre tiene lugar en el borde de la perforación en el vidrio, de manera que $\sigma = \alpha \sigma_{nom}$. Es decir, σ_{nom} es el valor máximo a tracción del panel sin considerar las perforaciones.

El primer paso consiste en obtener el valor de σ_{nom}

Ventajas y desventajas de este procedimiento

Este método es rápido, porque todos los cálculos que es necesario hacer, ya han sido realizados y reflejados en una serie de gráficas, similares a las que se utilizan para el cálculo de armaduras en zapatas cuadradas de hormigón. Por tanto la resolución de las complejas fórmulas necesarias para obtener la tensión máxima en la perforación, deja de suponer un problema para las personas que carecen de estos conocimientos.

La desventaja de este método es que hay que barajar un número de combinaciones relativamente alto, por lo tanto sería interesante estudiar si es

²⁸ Maria Fröling and Kent Persson. *“Design bolt fixed laminated glass with stress concentration factors”*. Paper 3. p. 65-79

²⁹ El coeficiente de concentración de tensiones (SCF-Stress Concentration Factor) en algunas bibliografías se designa con la letra “K”

posible reducir el número de posibilidades y suplir esa información mediante interpolación con curvas de tendencia.

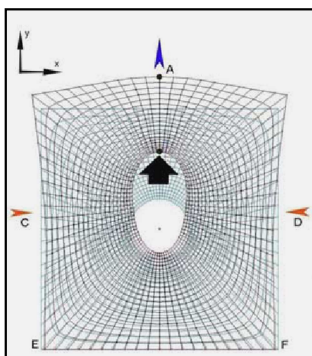
Otra desventaja es la de que mediante este procedimiento ocurre algo parecido que con el cálculo de armaduras para zapatas cuadradas de hormigón, es decir, lo mismo que las tablas de zapatas son válidas siempre que las zapatas son cuadradas, en este caso de estudio toda la formulación es válida únicamente para barandillas con unas condiciones geométricas determinadas. Para otros casos, como fachadas, escaleras, o cubiertas, habría que modificar desde el principio dicha formulación.

6.2. Diseño de las perforaciones en vidrio estructural³⁰ (DESIGN GLASS HOLES FOR BEARING)

La intención de simplificar procesos de cálculo y facilitar predicciones sobre el comportamiento del vidrio bajo hipótesis de carga comunes es un objetivo que motiva a buena parte del sector investigador del vidrio como elemento estructural.

Al ser un material tan frágil, complicado de estudiar, y que lleva poco tiempo en el sector de la construcción bajo aplicaciones estructurales, existe la tendencia de enfocar las investigaciones en aspectos muy localizados, que permitan mejorar la eficiencia de los sistemas diseñados.

“Este apartado recoge una serie de métodos e hipótesis para determinar las tensiones de tracción y la probabilidad de rotura a lo largo del anillo interior de las perforaciones en los paneles de vidrio estructural para algunas de las situaciones de carga más comunes”³¹.



El primer paso consiste en visualizar cual es la tendencia que sigue la deformación del hueco y del vidrio en su proximidad. Como ejemplo explicativo en la imagen 52 donde el panel está apoyado en la base (arista E-F), sometido a una carga puntual cualquiera en el punto indicado por la flecha en el sentido que marca la misma, se reflejan 3 tipos de deformación:

Ilustración 52: Deformación geométrica.
Design Glass Holes for Bearing

³⁰ Benjamin Fay. “Designing Glass Holes For Bearing: An Approach from First Principles Adapted for the Practising Structural Glass Engineer”. (www.glassfiles.com)

³¹ Benjamin Fay. “Designing Glass Holes For Bearing: An Approach from First Principles Adapted for the Practising Structural Glass Engineer”. Abstract. (www.glassfiles.com)

- a) La tendencia del hueco a tomar la forma de un óvalo.
- b) Deformación lateral en C y D
- c) Deformación vertical en A

Todo ello es consecuencia de la tendencia del panel a estirarse en sentido vertical (Y). Para evitar o dificultar que esto suceda, hay que actuar sobre estos tres factores de deformación. La forma más habitual de hacerlo es en el caso a) aumentar el espesor de vidrio, en el caso b) y c) aumentando la distancia de la perforación al borde del panel.

La siguiente imagen 53 representa la distribución de las tensiones e identifica los puntos críticos.

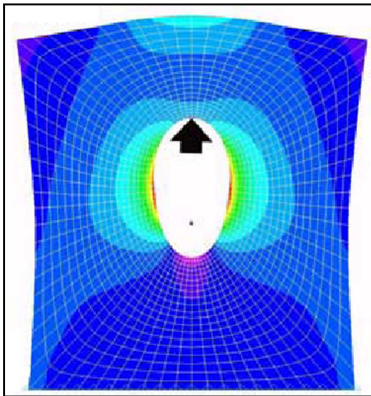


Ilustración 53: Distribución de tensiones. Design Glass Holes for Bearing

Las zonas izquierda y derecha del hueco tienen un radio de curvatura mucho mayor que el del hueco original, lo que crea tensiones de tracción muy perjudiciales por ser de carácter puntual: situación que se agrava en este tipo de soluciones ya que las microfisuras y desperfectos ocasionados en la superficie del anillo implican una reducción importante en la resistencia original del vidrio (Ver apartado 5.1 Estudio por autores sobre la microfisuración).

En contraposición las zonas superior e inferior se ven sometidas a esfuerzos puntuales de compresión, independientemente de las cargas que soporta el conjunto. Esto se debe a la reducción del radio de curvatura del hueco, sin embargo en este caso la tensión máxima que puede soportar el vidrio si se corresponde a la resistencia máxima que ofrece el material, porque esta no se ve perjudicada por las microfisuras o desperfectos superficiales de la perforación.

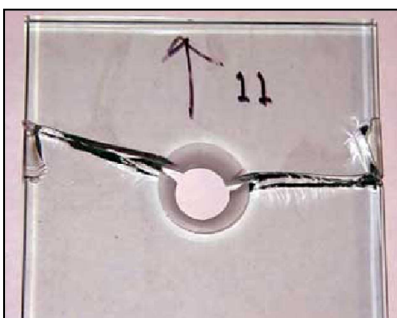


Ilustración 54: Rotura de placa de vidrio. Design Glass Holes for Bearing

En esta placa de vidrio con un hueco ensayada en las condiciones del ejemplo anterior se puede ver como el origen de rotura se encuentra en la zona prevista. Ambas roturas, principalmente la de la izquierda, han comenzado en la mitad superior del hueco, pero dentro de la zona de tracción. Analíticamente es imposible predecir el

punto exacto donde romperá el vidrio y esto se debe a que no se puede tener un control total

sobre las microfisuras y desperfectos, a menos que un fallo en la ejecución advierta una fisura representativa.

Modelos de cálculo

a) Gabriel Lamé:

El primer modelo de cálculo fue propuesto por Gabriel Lamé (1795-1870). Antes de la aparición de los programas de elementos finitos, este era el método más utilizado sobre la concentración de tensiones alrededor de huecos en paneles.

$$\sigma_{max} = K\sigma_{ave}$$

$$\sigma_{ave} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot t}$$

- P=fuerza aplicada en un punto
- a=radio interior del hueco
- t=espesor del panel

b) ReiBner, 1933

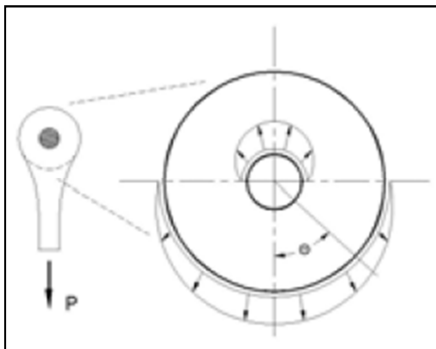


Ilustración 55: Distribución radial de tensiones (Reibner boundary conditions). Design Glass Holes for Bearing

Más adelante surgieron otros investigadores que desarrollaron técnicas diferentes. ReiBner, en 1933 estableció por primera vez la teoría de las reacciones radiales para los esfuerzos en el contorno de apoyo de las placas de vidrio.

Esto significa que si los vectores en cada punto de contacto en el que se aplica el esfuerzo P los vectores describen una dirección radial y no paralela a la fuerza P, es porque existe una componente tangencial, que es igual a cero en las intersecciones con los ejes vertical/horizontal y máxima en los puntos de contacto con un eje a 45° respecto a los ejes vertical u horizontal como se muestra en la imagen 56.

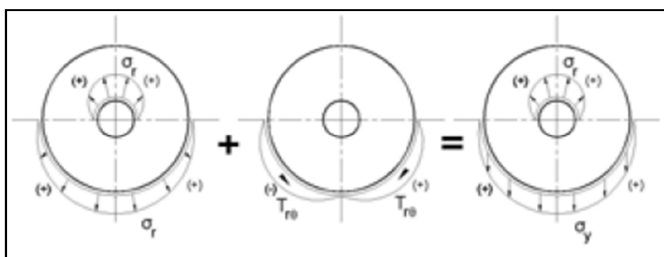


Ilustración 56: Tensión tangencial. Design Glass Holes for Bearing

Esta característica solo se da en el perímetro exterior y contribuye a la resistencia a la "ovalización", es decir que se deforme la circunferencia en un óvalo y por tanto reduce las tensiones en el anillo interior.

El problema de este ensayo es que no es representativo con respecto a los paneles rectangulares y cuadrados.

c) Earlier, Howland 1922:

Resuelve el problema de un panel de vidrio sometido a esfuerzos de tracción desde dos de los extremos opuestos de un panel con un hueco en el centro

d) Theocaris, 1956:

Combina la propuesta de Reibner y Earlier utilizando el método de Reibner, pero con un panel cuadrado, de esta manera consiguió un factor de concentración de tensiones mucho más preciso.

e) Peterson

Hipótesis de carga de un panel de vidrio con un hueco central

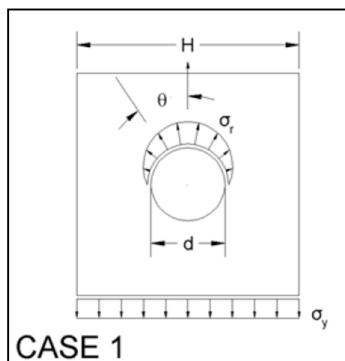


Ilustración 59: Caso 1. Tensión de tracción en el hueco

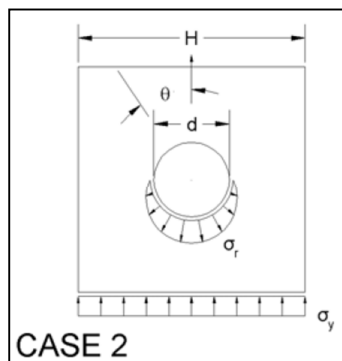


Ilustración 58: Caso 2. Tensión de compresión en el hueco

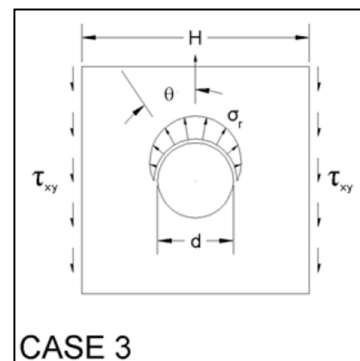


Ilustración 57: Caso 3. Tensión tangencial en ambos lado.

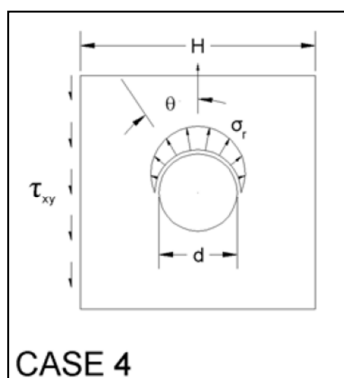


Ilustración 60: Tensión tangencial en un lado



Ilustración 61: Hueco en un panel traccionado

6.3. Influencia de la forma del perno y la junta elástica en la distribución de tensiones³²:

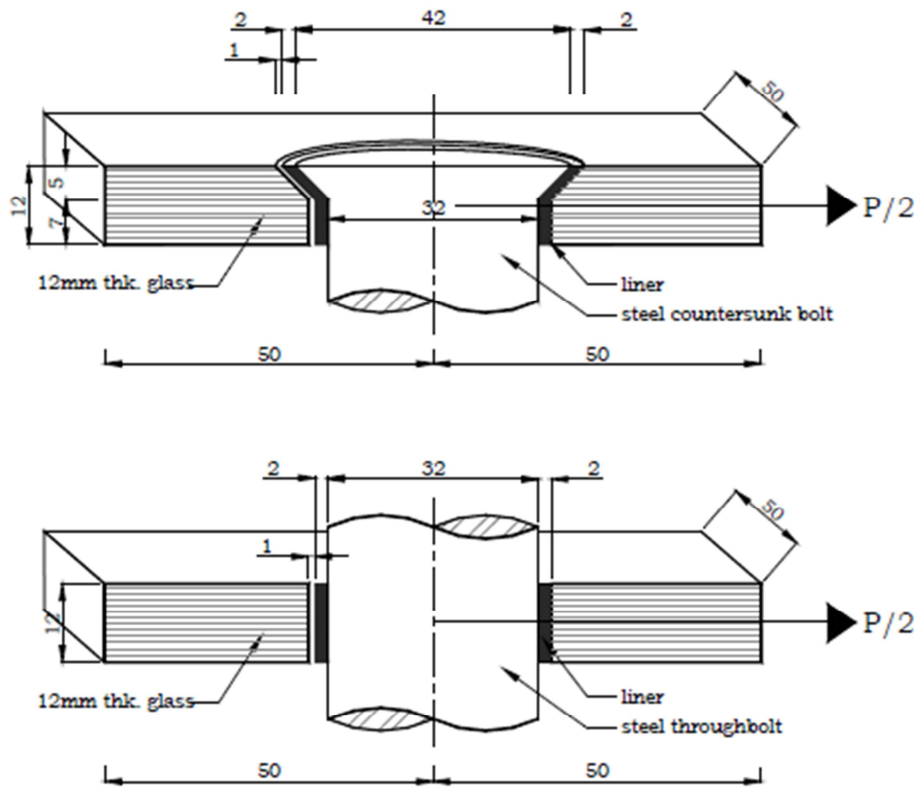


Ilustración 62: Pernos de conexión

Según el estudio comparado realizado en este artículo, el perno superior con cabeza troncocónica (*countersunk fixing*) causa una distribución de las tensiones desigual a lo largo del espesor del panel. La máxima tensión a tracción en la zona cilíndrica del primer anclaje es un 13% mayor que la tensión en la zona troncocónica y un 2% mayor que la obtenida en el segundo anclaje de tipo cilíndrico. Por lo tanto se puede decir que la calidad de la distribución de las tensiones mejora si la sección del perno es continua en todo el espesor del panel de vidrio.

En la junta elástica se ha utilizado nylon, que es un material deformable. A consecuencia de esto, en la zona de las tracciones no se ha observado diferencias apreciables. No obstante el área de las compresiones refleja un sustancial descenso y mejor distribución de las tensiones.

³² M. Overend. *Optimising connections in structural glass*.

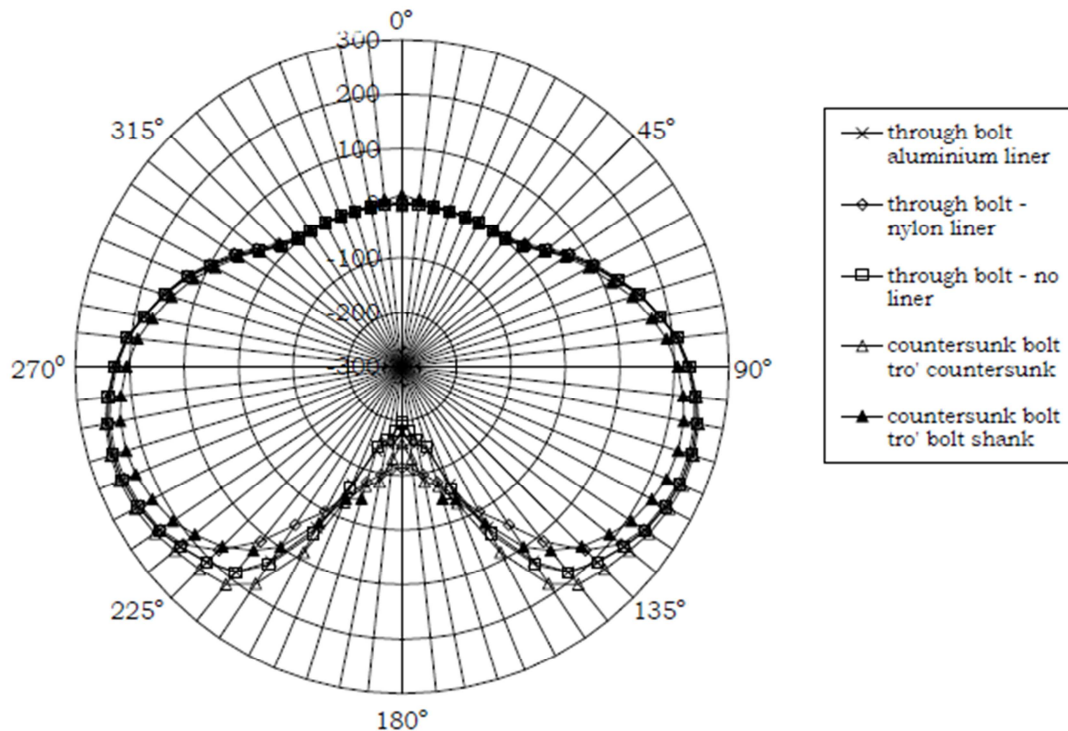


Ilustración 63: Esfuerzos alrededor del contorno del hueco del panel, con distintos materiales para la junta elástica

En el gráfico superior, que servirá de modelo para los análisis comparativos de este trabajo, aunque la calidad visual no sea buena, se aprecia que en la zona superior de compresiones el comportamiento de los cinco casos estudiados prácticamente no varía, alejándose muy poco de la circunferencia que indica el valor cero (las circunferencias de mayor diámetro que indica valores positivos se refiere a las tracciones y las de menor diámetro con valor negativo corresponden a las compresiones). En el sector inferior, que también pertenece al lado de las compresiones las diferencias están más acusadas. Esto justifica que un material elástico permita una mejor distribución de las tensiones internas, de la que habría en su ausencia.

6.4. Influencia de la holgura entre el perno y el taladro en la distribución de tensiones

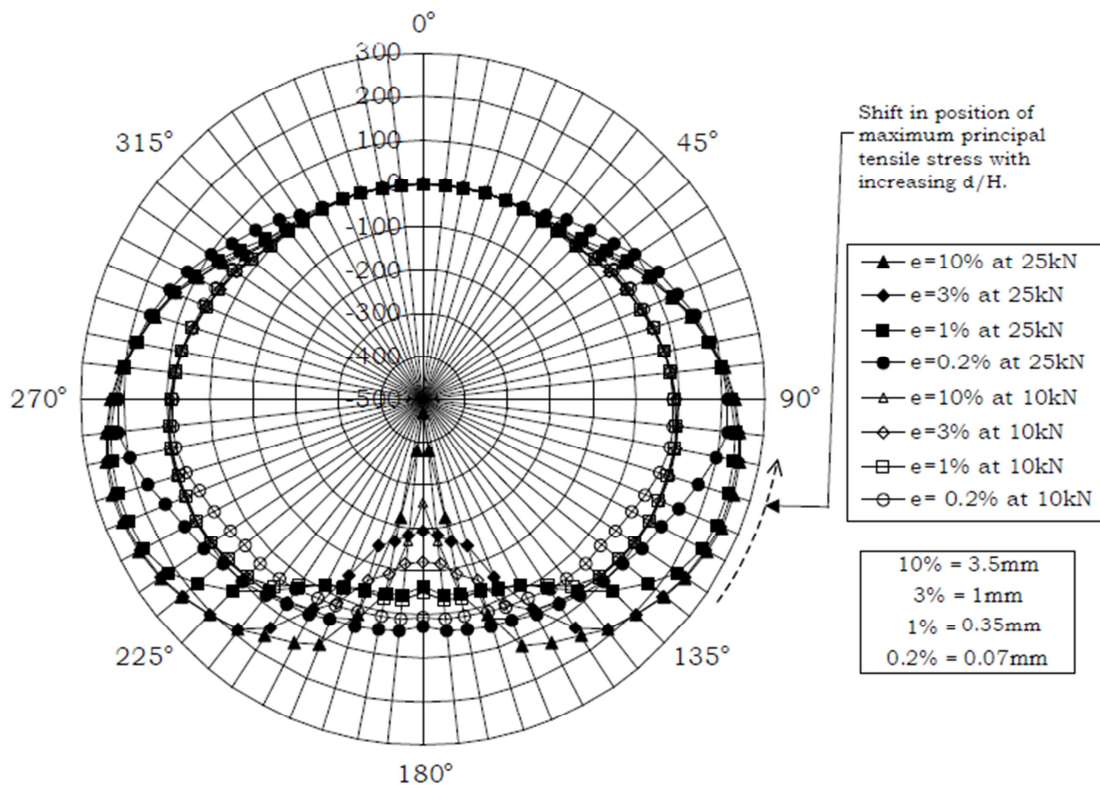


Ilustración 64: Esfuerzos alrededor del contorno del hueco del panel, con distintas holguras

El diagrama superior recoge las tensiones en el borde del taladro para los casos enunciados en la leyenda de la derecha. Se han estudiado cuatro holguras distintas de 0.07mm, 0.35mm, 1mm y 3.5mm y dos hipótesis de carga, una de 10kN y otra de 25kN.

La tendencia de las curvas de las cuatro holguras para las dos hipótesis de carga es similar en ambas y más pronunciada en el análisis con 25kN.

La zona superior del diagrama representa la sección de contacto entre el perno y el hueco del panel, donde se transfieren las tensiones del panel al anclaje.

Los valores del gráfico indican las tensiones internas que se generan como consecuencia de la tendencia del panel en la zona del hueco a deformarse. Por tanto la zona superior no se ve sometida a deformaciones en ninguno de los casos porque el propio perno lo impide, ya que para que se deformase el hueco, también tendría que hacerlo el perno. En el resto del lado del hueco hay un margen de separación. Cuanto menor es la holgura más se acercan los

valores del gráfico al cero, sin embargo se aprecia la aparición de tensiones de tracción en los laterales y de compresión en la zona inferior. A medida que la holgura aumenta, la deformación también crece, lo que repercute directamente en unas tensiones puntuales más acusadas.

Es interesante como a medida que se aumenta la carga en el hueco, las tensiones de tracción se orientan progresivamente hacia el hemisferio inferior del diagrama.

La solución con respecto a las holguras entre hueco y perno parecen dirigirse hacia medidas pequeñas, que proporcionen suficiente espacio para disponer una junta elástica de espesor mínimo que permita la adecuada distribución de las tensiones en toda la sección del panel.

Las holguras más grandes favorecen la deformación del hueco y con ello propician la aparición de esfuerzos internos no deseados.

7. ESTUDIO COMPARADO

7.1. Introducción

En este apartado se presenta un estudio comparado en el que se ha simulado con el programa Straus7 una barandilla (apartado 7.3) y un panel para fachada (apartado 7.4) bajo condiciones similares a las empleadas en las simulaciones realizadas con el programa desarrollado por Jens Malmborg, ClearSight, en su tesis³³.

El objetivo es determinar si los resultados son similares en ambas aplicaciones y analizar las discrepancias que resulten entre los dos.

El apartado 7.5 desarrolla un estudio realizado sobre paneles cuadrados de distintas medidas para determinar como influye la reducción de la dimensión de sus lados en la generación de tensiones adicionales en un hueco dispuesto en el centro bajo una carga uniformemente repartida de tracción.

Para consultar información gráfica más detallada de los modelos simulados se puede consultar el anexo I, que contiene un catálogo de imágenes de todos los modelos simulados en los siguientes apartados.

Para examinar los valores numéricos empleados en los gráficos, que se refieren a los modelos estudiados se puede acudir al anexo II, que contiene las tablas numéricas con todos los datos empleados.

7.2. Características y parámetros comunes a las tres simulaciones realizadas en Straus7.

- Mallado:

Aunque en un principio el mallado iba a ser triangular, para asemejar los modelos a los de ClearSight, finalmente se ha mallado con elementos bidimensionales “*plate*” de cuatro nodos y tridimensionales “*bricks*” ocho nodos, pues por un lado reproducen mejor la realidad y por otro encaja mejor con el mallado manual según se explica en el “*apartado 3.2.4.2.2. Mallado*”, páginas 38-40.

³³ J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006).

Para agilizar la elaboración de los modelos de la barandilla y el panel de fachada se ha construido un módulo independiente que abarca el perno, las juntas y la parte del panel de vidrio correspondiente al mallado manual.

- Condiciones de contacto y restricciones:

Esto se refiere a las juntas elásticas entre el vidrio y el perno de acero.

En el diseño del primer módulo se utilizó la opción “*attachment*”, que consiste en que el programa crea elementos lineales automáticamente que une los nodos más próximos entre en vidrio y el acero, para simular la junta elástica, una vez se hayan introducido las propiedades de los materiales que la forman. Sin embargo por errores indeterminados en la simulación se optó como segunda opción por dibujar las juntas con elementos tridimensionales.

Para este trabajo se ha simplificado el proceso de cálculo considerando que la curva tensión-deformación de todos los materiales es lineal y simétrica para tracciones y compresiones ya que los principales materiales empleados, como son el vidrio y el acero teóricamente cumplen esta condición.

Por último se ha considerado, para la barandilla y la fachada, que uno de los lados del perno es fijo, es decir, que los nodos que lo componen tienen restricción de desplazamiento y giro en sus tres ejes. En el último apartado sobre paneles cuadrados se ha restringido de la misma manera el desplazamiento y giro del lado inferior, para estabilizar el modelo.

- Características del perno y juntas elásticas:

Perno: En todas las simulaciones se emplea un perno con pasador cilíndrico conectado a dos discos en sus extremos, que permanecen en contacto con el vidrio. El pasador interior tiene una longitud de 20mm (16mm del espesor del panel de vidrio + 2mm de junta elástica a cada lado) y un diámetro de 32mm. Cada disco tiene un espesor de 10mm y un diámetro que debería ser 50mm, sin embargo puesto que no se había previsto correctamente la correlación entre el mallado del vidrio y del perno, se ha utilizado como diámetro la misma dimensión que tiene el círculo concéntrico del mallado manual del panel de vidrio que más se aproxima, siendo esta medida 54,72mm.

Juntas elásticas: Entre el pasador y el vidrio la junta es de mortero híbrido (ver apartado “3.2.2. *Juntas elásticas entre el perno y el vidrio*”, p. 33-36) y entre los discos y el vidrio se han colocado arandelas de nylon. Ambas juntas tienen un espesor de 2mm.

- Nomenclatura:

Para indicar la posición de las zonas de estudio se utilizan palabras como lado interior, lado exterior y hueco 1. El lado interior se refiere al paramento de cada panel que mira al interior del edificio, para fachada o que está del lado de las personas para las barandillas. Todas las restricciones de movimiento de los pernos se han dispuesto en este lado, puesto que es donde habitualmente se encuentra la estructura a la que se conectan. El lado exterior es el opuesto. En la imagen 73 (página 73) se detallan cuatro planos de estudio por tratarse de un vidrio laminado. Sin embargo como se verá más adelante en las simulaciones realizadas con straus7 este efecto no se ha conseguido, es decir el panel se comporta como una única lámina, por lo tanto en las simulaciones con straus7 solo se habla de lado interior (*"inner glass, free surface"*) y lado exterior (*"outer glass free surface"*).

Puesto que para cada panel todos los huecos se comportan de la misma manera, guardando una determinada simetría es suficiente con analizar solo uno. Para designar el hueco a estudiar se le designa como hueco 1, haciendo referencia a su posición exacta.

7.3. Barandilla

7.3.1. Características

- Geometría de la barandilla:

2m de largo, 1,2m de alto, compuesto por dos láminas de vidrio de 8mm de espesor cada una y una capa intermedia de PVB de 0,76mm de espesor.

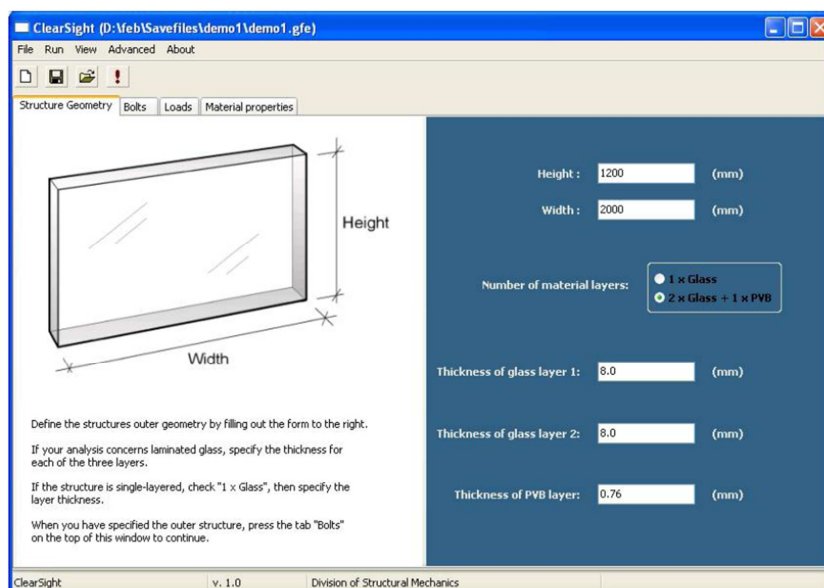


Ilustración 65: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 21

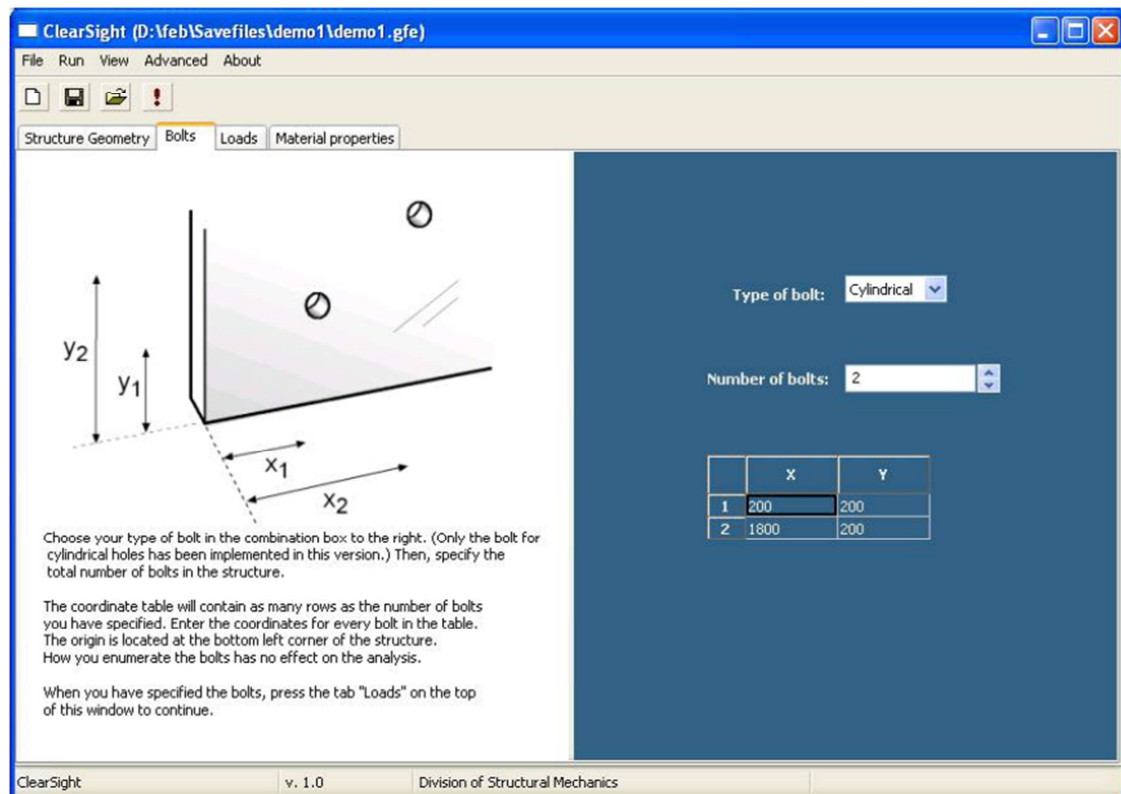


Ilustración 66: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 22

Los dos pernos están colocados a 200mm desde los laterales izquierdo y derecho hasta el eje del anclaje, respectivamente e igualmente están situados a 200mm respecto el borde inferior hasta el eje de la conexión. El sistema de coordenadas del programa tiene como punto de origen el vértice inferior izquierdo, por tanto la coordenada horizontal (X) del anclaje derecho es igual a la longitud menos la separación ($x = 2000 - 200 = 1800\text{mm}$). La imagen del panel con los dos huecos de la ilustración superior es un croquis explicativo, pero no representa gráficamente los datos introducidos.

En este programa no es necesario introducir las dimensiones de los pernos (bolts), porque se ha desarrollado con un único tipo de anclaje cilíndrico de discos, en el que el diámetro interior es $d=30\text{mm}$ y el exterior $D=50\text{mm}$.

Aunque en este análisis se han empleado únicamente dos pernos, uno a cada lado, en la realidad esto es inviable ya que se necesitan dos pernos en cada lado sobre la misma vertical para contrarrestar de forma eficiente los momentos debido a la flexión tipo voladizo que se produce en la base del panel. Al haber un único perno en cada lado, el anclaje queda sometido a tensiones extremas de forma innecesaria.

Como se ha mencionado con anterioridad con ánimo de establecer una comparación entre ambas aplicaciones se realizará una simulación en Straus7 con estas condiciones, pero con posterioridad se simulará un nuevo modelo con dos pernos a cada lado, para analizar el comportamiento de un panel en una barandilla en condiciones más similares a la realidad.

- Hipótesis de carga:

La barandilla está sometida a una carga lineal a lo largo del borde superior igual a 800 N/m, simulando una fila de personas apoyadas en ella.

Según el DB-SE-AE el valor que se debe utilizar para comprobar que una barandilla cumple con la norma es 800N/m (0,8KN/m) según la tabla 3.3: Acciones sobre barandillas y otros elementos divisorios del DB-SE-AE. *“La fuerza se considerará aplicada a 1,2m de altura o sobre el borde superior del elemento, si éste está situado a menos altura”* (Ver apartado 3.2 del DB-SE-AE).

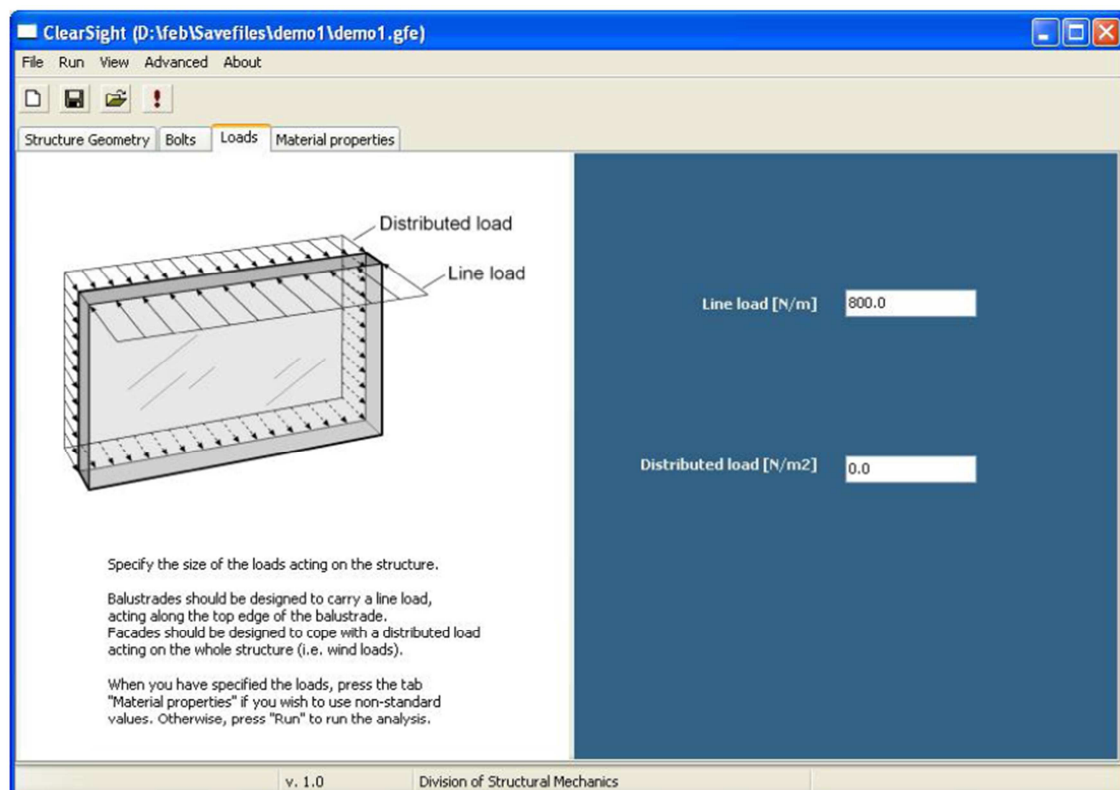


Ilustración 67: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 23

- Propiedades de los materiales:

Se consideran las siguientes propiedades para el vidrio laminado y el PVB:

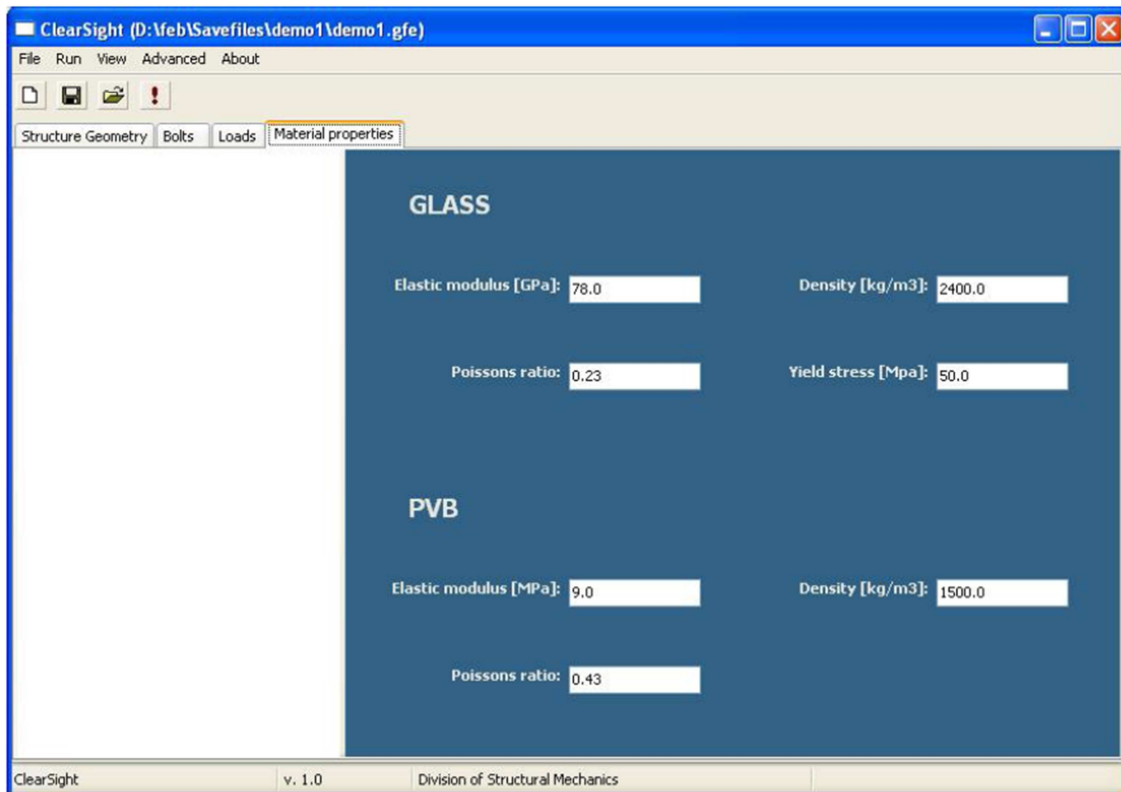


Ilustración 68: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 24

E = Módulo de elasticidad (Elasticity modulus)

ν = Coeficiente de Poisson (Poissons ratio)

ρ = Densidad (Density)

Fluencia (Yield stress)

- Características del mallado:

La base del mallado de una placa de vidrio son los elementos plate ya que dos de sus dimensiones destacan frente a la tercera (espesor). Para el mallado pueden emplearse tanto “plates” de 3 nodos (triángulos) como de 4 nodos (cuadrados). La principal diferencia consiste en que el triángulo al ser una

figura indeformable, la simulación generará una figura algo más rígida que utilizando elementos “plate” de 4 nodos. Por tanto las deformaciones por pandeo o flexión serán algo más pronunciadas con elementos “plate” de 4 nodos.

En la aplicación informática sobre la que se apoya este proyecto como herramienta comparativa³⁴, solo existe la posibilidad de mallar con “plates” de 3 nodos, debido a que el modelo de mallado que mejor encajaba con las características del proyecto, por diversas razones, era el desarrollado por Jonathan Shewchuk³⁵ (<http://www.cs.cmu.edu/~jrs/jrspapers.html>), sin embargo por las razones expuestas en el apartado 7.2 el mallado realizado con straus7 se basará en elementos cuadrados.

Para la realización del mallado se ha extruido una malla 2D, para crear una malla en 3D.

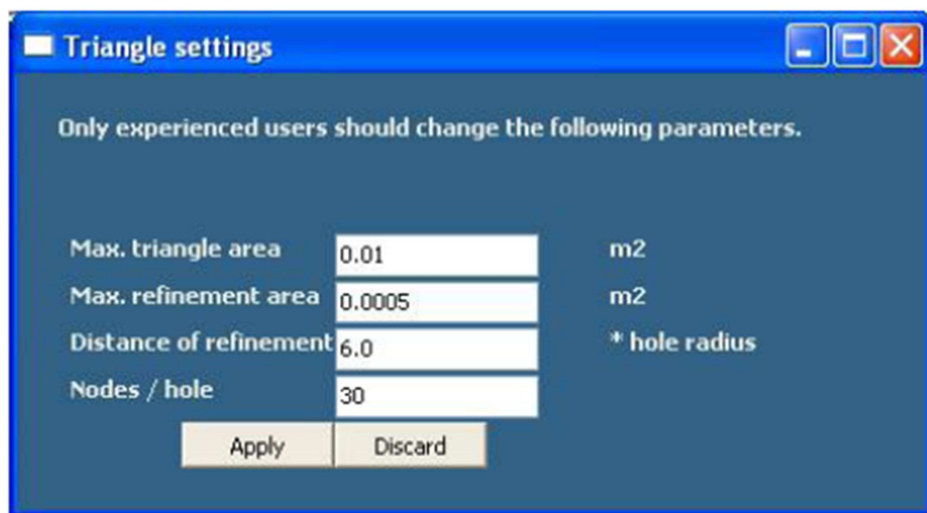


Ilustración 69: J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 24

La ilustración superior forma parte del panel de opciones de programa ClearSight desarrollado en la Universidad de Lund para el cálculo de tensiones en paneles de vidrio con anclajes puntuales. Las características que se definen son las siguientes:

³⁴ Shewchuk J., Triangle - A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html> [as viewed 2005-11-10].

³⁵ Shewchuk J., Triangle - A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html> [as viewed 2005-11-10]. p. 26

- ✓ “*Max. triangle área*”: El área máxima que cubre cada triángulo en 2D que pertenece al mallado del panel.
- ✓ “*Max. refinement área*”: El área máxima que cubre cada triángulo que se encuentra en el espacio afectado por el hueco del anclaje.
- ✓ “*Distance of refinement*”: Delimita la superficie del panel en la que se reduce la superficie de los elementos “*plate*”.

Esta ventana inferior da al usuario la opción de escoger el número de mallas 2D por cada capa. Lo mínimo son dos para el vidrio (1 por cada lado) y 1 para la lámina de PVB.

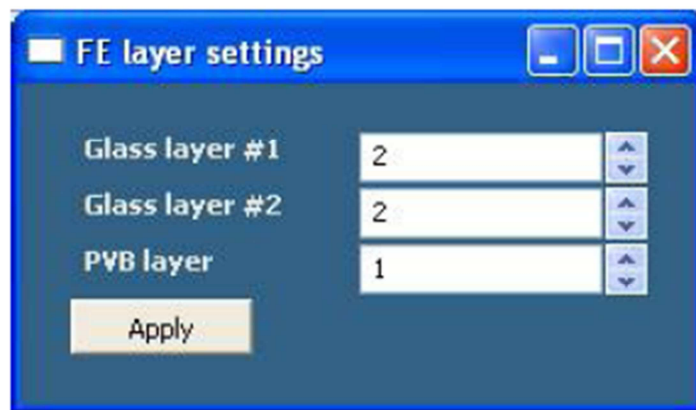


Ilustración 70: J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 25

La imagen inferior representa la apariencia del mallado cuando hay muchas capas por cada lámina de material. El resultado que se obtiene al aumentarlas es un incremento del número de nodos, por lo que el resultado es más exacto, pero en contraposición el tiempo de cálculo se eleva.

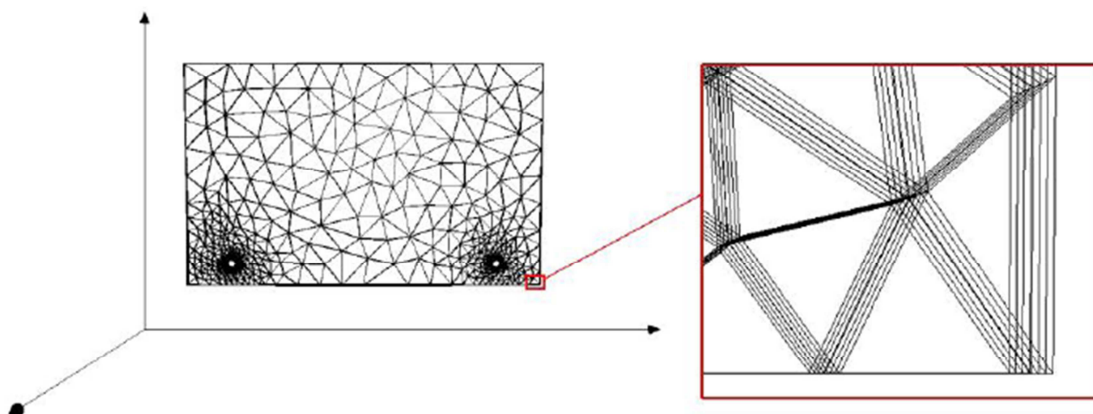


Ilustración 71: J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 31

Denominación de las caras del panel:

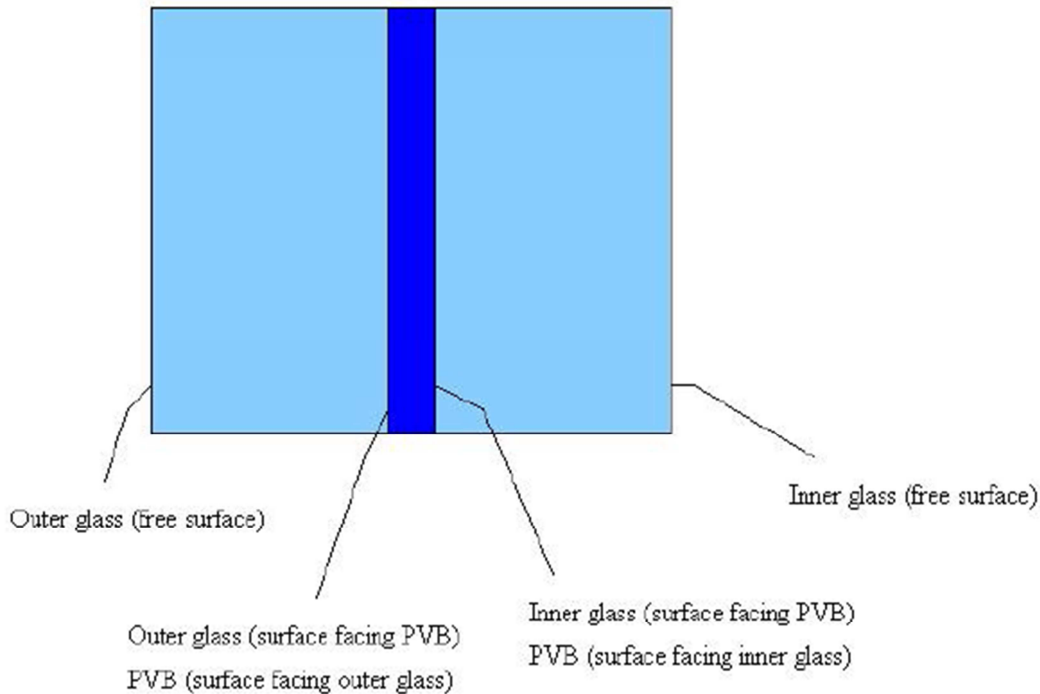


Ilustración 73: denominación de cada cara del panel.

J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 58

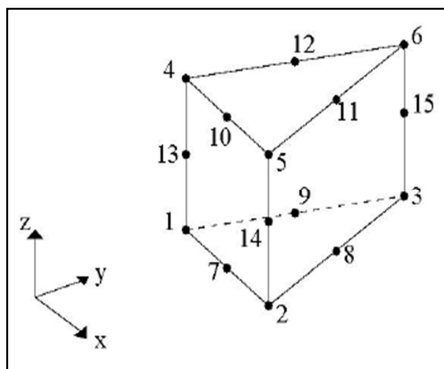


Ilustración 74: J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 31

Cada elemento “brick” que compone el panel de vidrio tiene una geometría similar a esta ya que cada uno se ha creado por extrusión a partir de un “plate” triangular. Una vez se crea la malla el programa automáticamente genera un nodo adicional en el punto medio de cada elemento “beam” que conecta los nodos originales, de esta manera se pasa de “bricks” de 6 nodos a “bricks” de 15 nodos. Lo cual mejora la aproximación de los resultados, pero lo mismo que ocurría anteriormente, el tiempo de cálculo se incrementa.

7.3.2. Simulación de la barandilla de 2 pernos:

7.3.2.1. Simulación de la barandilla de 2 pernos con ClearSight:

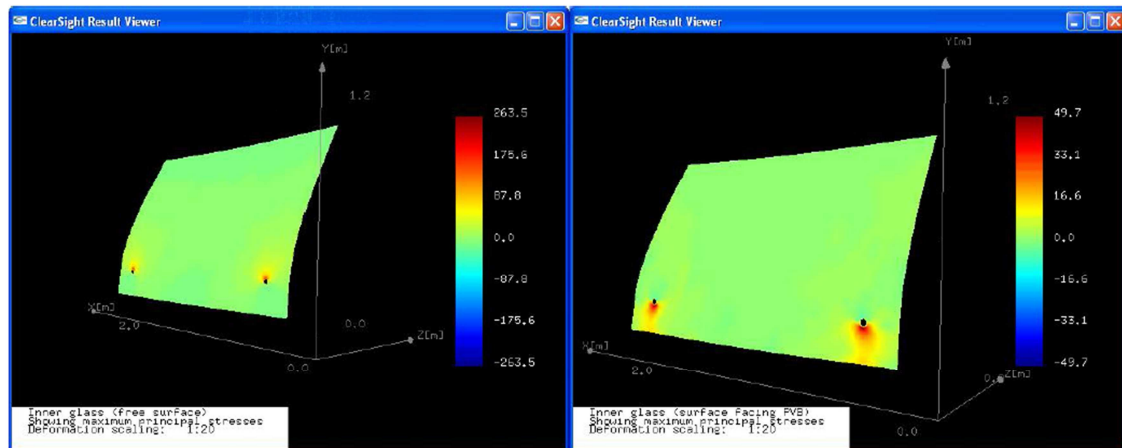


Ilustración 75: Esquema de esfuerzos de tensiones máximas J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 63

Las imágenes muestran el esquema de esfuerzos de tensiones máximas en MPa, correspondiendo el color rojo al lado de las tracciones y el azul a las compresiones. La ilustración de la izquierda representa la cara libre de la lámina de vidrio interior (inner glass, free surface), según lo indicado en la imagen superior aclaratoria. La ilustración de la derecha muestra la cara en contacto con la capa de PVB de la lámina de vidrio interior.

- Análisis estructural:

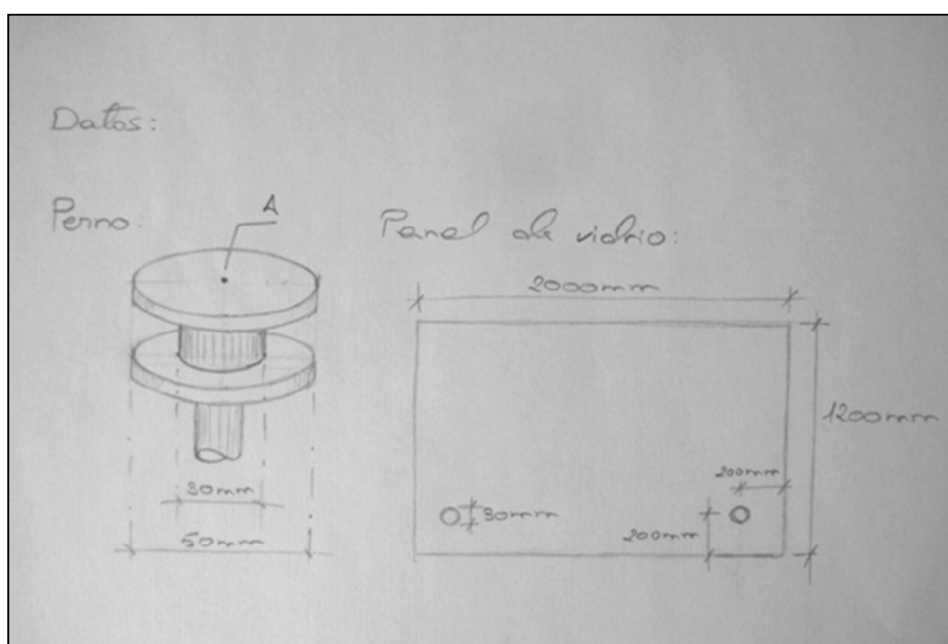


Ilustración 76: Producción propia

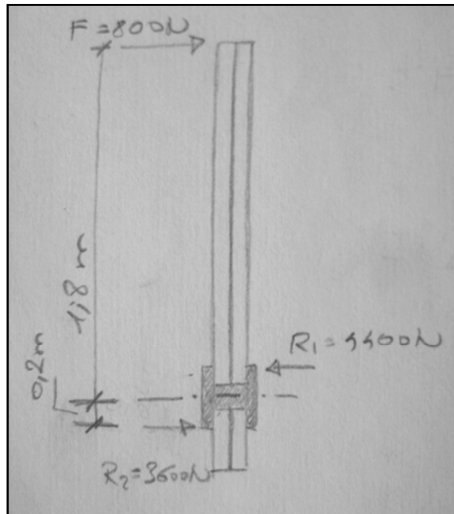


Ilustración 77: Producción propia

Acciones:

$$q = 800 \text{ N/m} \rightarrow F = \frac{q \cdot 2 \text{ metros}}{2 \text{ pernos}} = 800 \text{ N/perno}$$

$$\sum F = 0 \rightarrow F + R_2' = R_1'$$

$$R_1' = 800 \text{ N}$$

$$R_2' = 0$$

$$\sum M_A = 0 \rightarrow Fd_1 - R_1''d_2 - R_2''d_2 = 0$$

$$R_1'' = R_2'' \rightarrow 800 \times 1,8 - 2(0,2R_1'') = 0$$

$$R_1'' = R_2'' = 3600 \text{ N}$$

$$R_1 = R_1' + R_1'' = 800 \text{ N} + 3600 \text{ N} = 4400 \text{ N}$$

$$R_2 = R_2' + R_2'' = 0 + 3600 \text{ N} = 3600 \text{ N}$$

Las zonas negras son las áreas sometidas a las mayores tensiones puntuales. Por tanto es necesario estudiarlas detenidamente. No obstante al ser zonas sometidas a compresión la rotura no debería producirse en tales puntos.

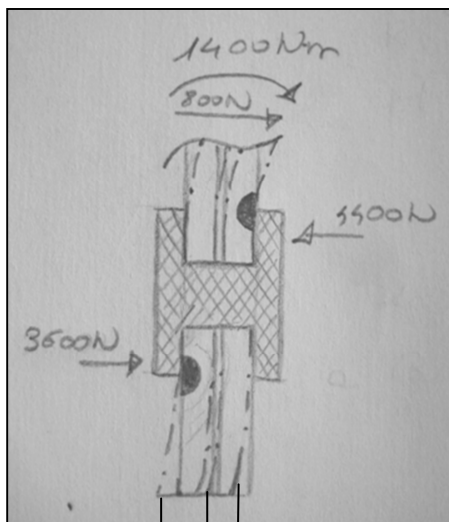


Ilustración 78: Producción propia

- Cara libre de la lámina de vidrio interior
- Cara en contacto con la capa de PVB de la lámina de vidrio interior
- Cara libre de la lámina de vidrio exterior

La zona negra de la derecha está del lado de las compresiones por tanto la tensión será mayor, que en el lado de la izquierda, que se encuentra del lado de las tracciones.

En la imagen izquierda de la simulación que representa la cara libre de la lámina de vidrio interior, las tensiones máximas que se alcanzan de 263,5 MPa son mucho mayor que las que se producen en la cara en contacto con la capa de PVB de la lámina de vidrio interior, no solo por lo que se explica en el

párrafo anterior, sino porque hay que considerar que en el primer caso las tensiones se generan en el plano de estudio, mientras que en el segundo caso no es así, por eso las tensiones en la cara en contacto con la capa de PVB alcanzan solo un máximo de 49,7 MPa (5 veces menor), debido a que en el plano de estudio las tensiones se han distribuido, con respecto a la tensión que se origina en la cara libre de la lámina de vidrio exterior.

7.3.2.2. Simulación de la barandilla de 2 pernos con Straus7:

Se han utilizado los mismos parámetros que en el caso anterior, a excepción del mallado y en las dimensiones del perno (como se explica en el “*apartado 7.2, punto 3: características del perno y juntas elásticas*”). Las imágenes adjuntas describen el comportamiento de la barandilla bajo una carga lineal uniformemente repartida en el borde superior. En el modelo 3.1 esta carga es de 0,8N/mm y en el modelo 3.2 es 1,6N/mm.

Para ver todo el banco de imágenes de los modelos 3.1 y 3.2 ver anexo I.

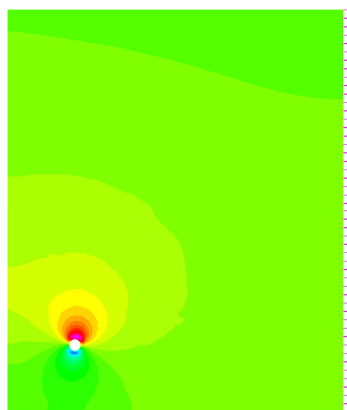


Ilustración 81: Vista frontal desde el lado interior. Modelo 3.1

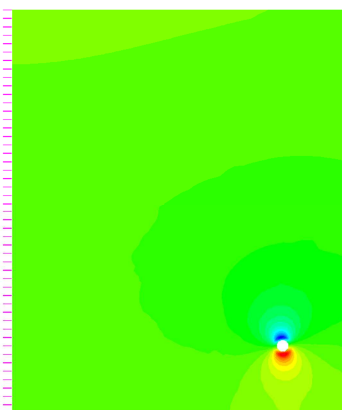


Ilustración 80: Vista frontal desde el lado exterior. Modelo 3.1

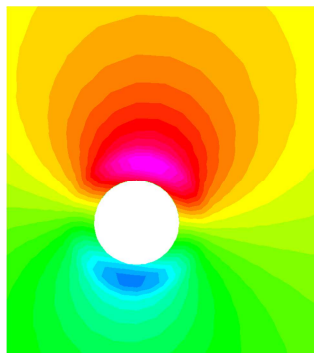


Ilustración 83: Detalle del hueco interior. Modelo 3.1

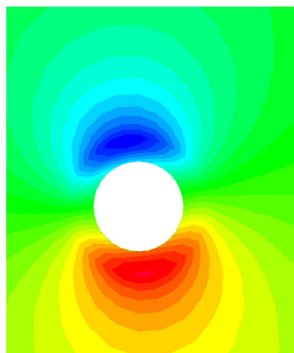


Ilustración 82: Detalle del hueco exterior. Modelo 3.1

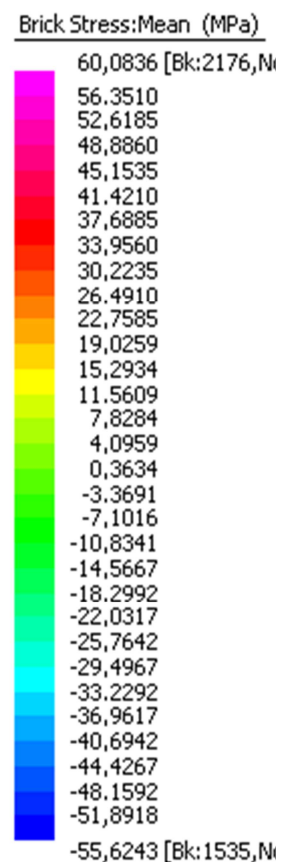


Ilustración 79: Leyenda de colores (N/mm²)

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

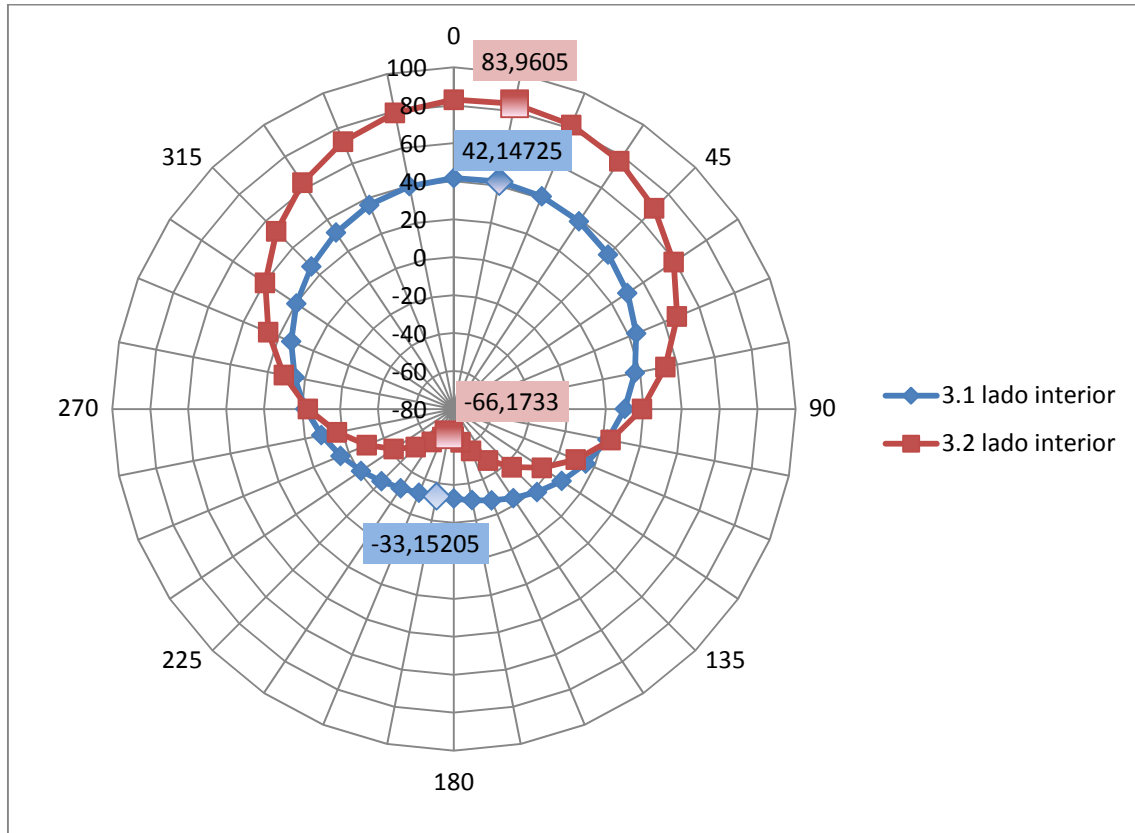


Gráfico 1: Tensiones alrededor del hueco 1 en el lado interior. Modelos 3.1 (0,8N/mm²) y 3.2 (1,6N/mm²)

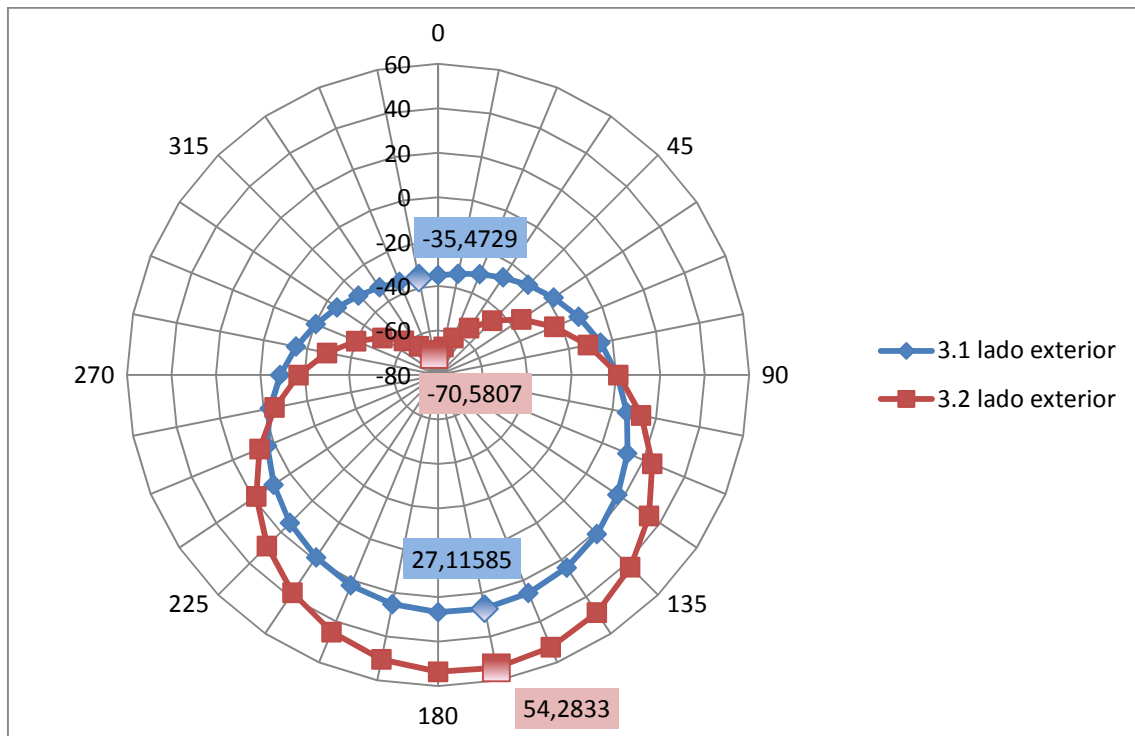


Gráfico 2: Tensiones alrededor del hueco 1 en el lado exterior. Modelos 3.1 (0,8N/mm²) y 3.2 (1,6N/mm²)

Al solo existir un perno en cada extremo para equilibrar el momento que genera la carga lineal aplicada en el canto superior de la barandilla, las tensiones en el hueco se disparan.

- Análisis de los gráficos:

En la gráfica 1 de las tensiones en el lado interior del hueco las tensiones de tracción son un 27% mayor que las de compresión tanto en el modelo 3.1 como en el 3.2. En cambio en la siguiente gráfica 2 donde aparecen las tensiones en el hueco en el lado exterior, esta proporción se invierte siendo las compresiones un 30% mayor que las tracciones. Esto significa que las tensiones tanto de tracción como de compresión incrementan en el contorno superior entre un 27% y un 30% con respecto al inferior.

En lo que respecta a la carga, las gráficas indican que su aumento es proporcional a las tensiones en el hueco, puesto que el doble de carga genera tensiones el doble de grandes.

7.3.2.3. Simulación de barandilla de 4 pernos con Straus7:

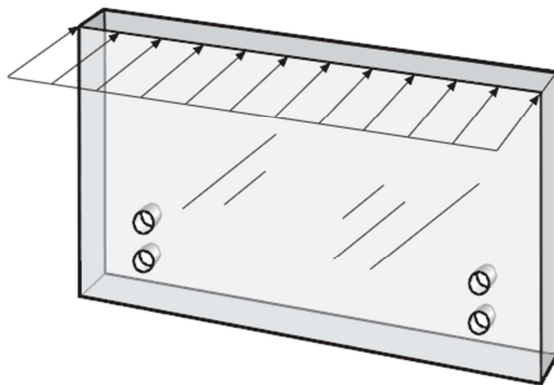


Ilustración 84: Barandilla de vidrio con dos pernos en cada esquina inferior. Maria Fröling. *Strength Design Methods for Laminated Glass*

Esta segunda simulación de una barandilla tiene por objetivo determinar como influye un segundo perno en cada lado en la reducción de tensiones alrededor del hueco. Se prevé una reducción significativa de las tensiones en los dos pernos superiores, en comparación con la barandilla anterior. Por un lado la

distancia entre el perno superior y el canto superior del panel es inferior que en la barandilla anterior y por otro el perno inferior contrarresta el momento que provoca la carga lineal, tomando como centro de giro el perno superior.

A continuación se presenta un estudio sobre la distribución de las tensiones en los huecos de los pernos superiores, que distan de los pernos inferiores 250mm de eje a eje, para después compararlo con la barandilla anterior. La barandilla de cuatro pernos se ha simulado con una carga lineal de 0,8N/mm

en el modelo 4.1 y posteriormente con una carga de 1,6N/mm, análogamente a la barandilla anterior en los modelos 3.1 y 3.2.

Se ha escogido una separación vertical entre pernos de 250mm, que es relativamente pequeña, por un lado porque si se colocase el segundo par de pernos en las esquinas superiores la simulación sería muy similar al panel para fachada estudiado en el apartado 7.5 y por otro lado los anclajes puntuales en paneles de vidrio tienen principalmente fines estéticos y puesto que se requiere una estructura tubular de acero que arranque del suelo para conectar con dichos pernos, se tiende a minimizar la altura a la que se colocan para reducir la longitud de la estructura portante de acero.

La simulación (ilustraciones 85-87) muestra que en los pernos superiores sigue habiendo tensiones puntuales, mientras que en los inferiores se aproximan al cero, manteniendo valores homogéneos en todo el contorno del hueco.

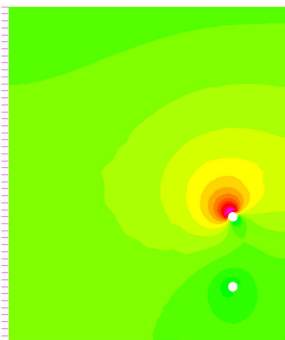


Ilustración 86: Vista frontal desde el lado interior. Modelo 4.1

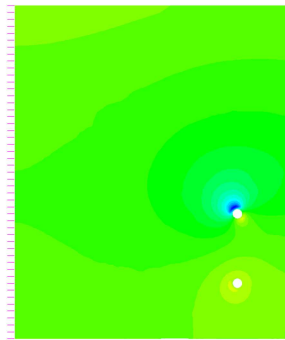


Ilustración 85: Vista frontal desde el lado exterior. Modelo 4.1

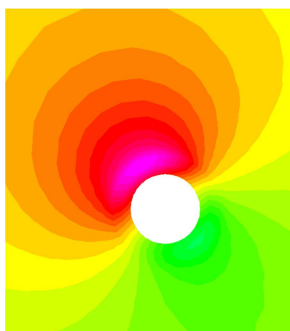


Ilustración 89: Detalle del hueco superior desde el lado interior. Modelo 4.1

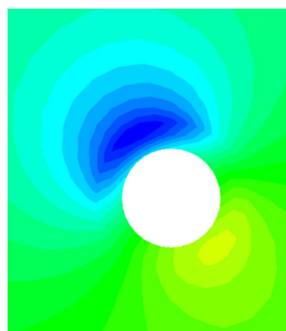


Ilustración 88: Detalle del hueco superior desde el lado exterior. Modelo 4.1

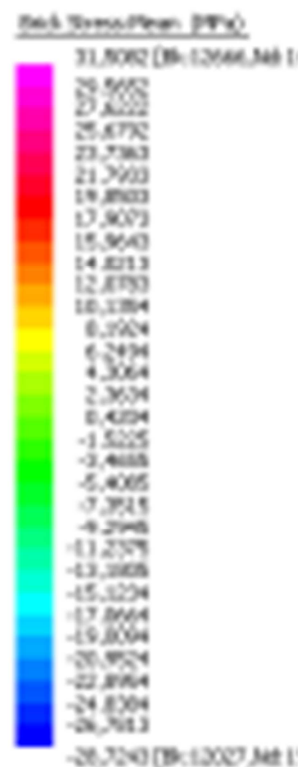


Ilustración 87: Leyenda de colores. Modelo 4.1 (N/mm²)

En las siguientes gráficas el color azul corresponde al modelo 4.1 (0,8N/mm) y el rojo al modelo 4.2 (1,6N/mm). Duplicando el valor de la carga se quiere observar si las tensiones en los huecos también lo hacen, al igual que en los modelos 3.1 y 3.2.

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

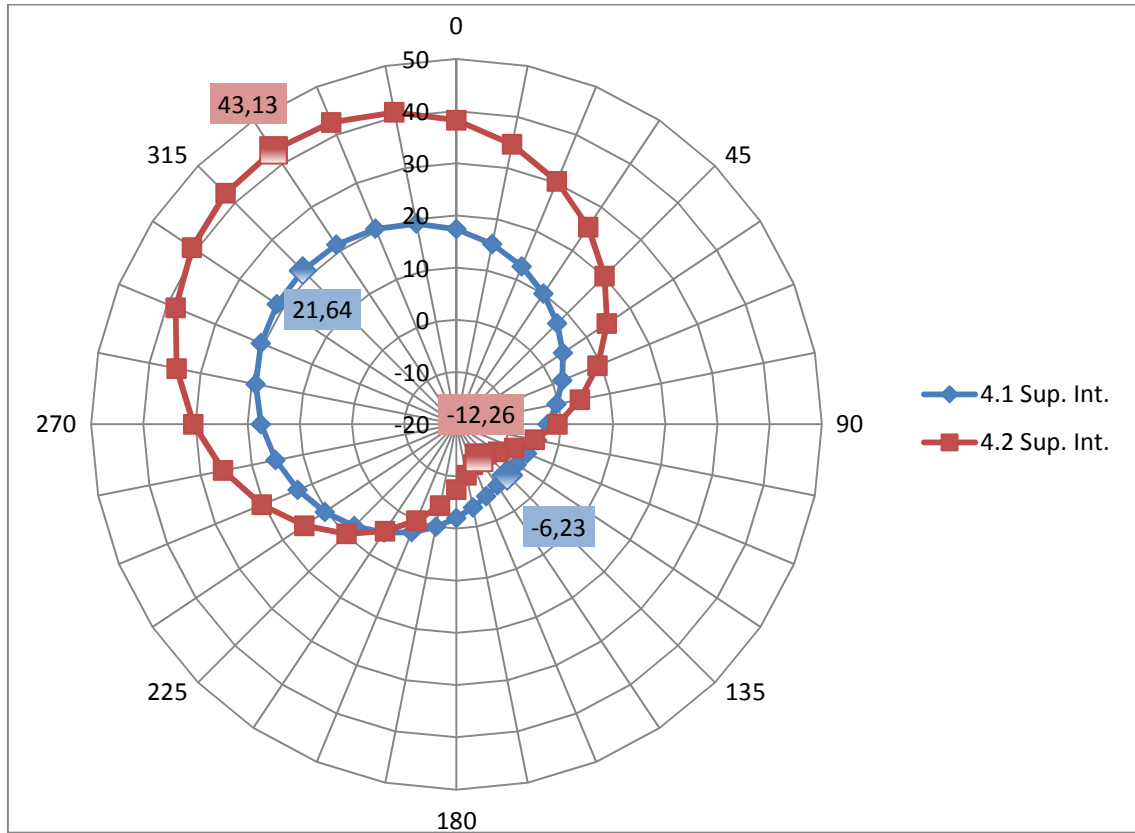


Gráfico 3: Tensiones alrededor del hueco superior en el lado interior. Modelos 4.1 y 4.2 (N/mm^2)

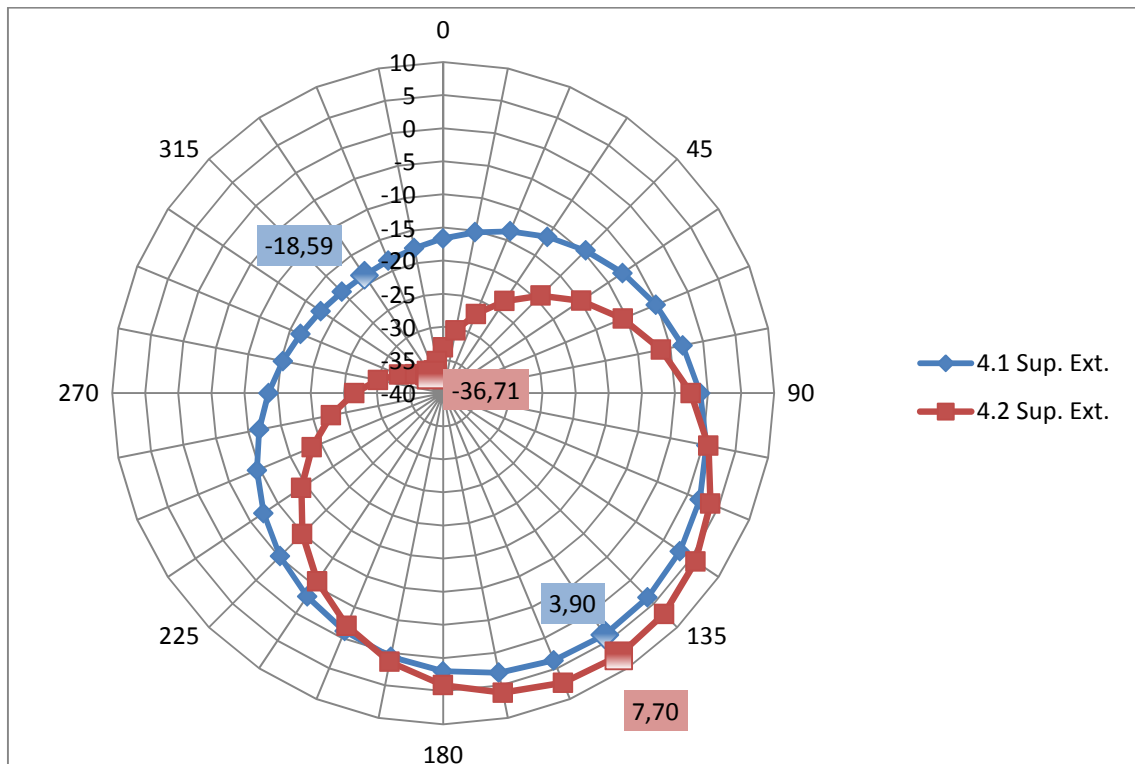


Gráfico 4: Tensiones alrededor del hueco superior en el lado exterior. Modelos 4.1 y 4.2 (N/mm^2)

- Análisis de los gráficos:

En el gráfico 3 las tensiones máximas de tracción en el borde superior del hueco son aproximadamente 3,5 veces superiores a las tensiones mínimas de compresión. El gráfico 4 muestra que los valores de las compresiones máximas del borde superior son 4,76 veces superiores que las de tracción del borde inferior.

En esta barandilla las tensiones siguen siendo proporcionales al aumento de la carga, puesto que los valores de la curva roja (4.2) son el doble de los que muestra la curva azul (4.1).

- Comparación entre la barandilla de 2 pernos (modelos 3.1 y 3.2) y la de 4 pernos (modelos 4.1 y 4.2) con el programa Straus7:

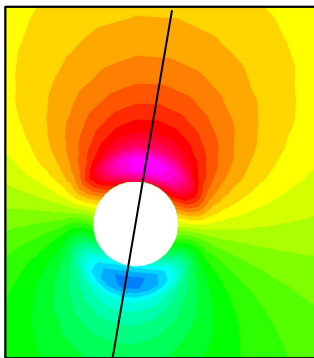


Ilustración 91: Dirección de las tensiones en el hueco del lado interior. Modelo 3.1

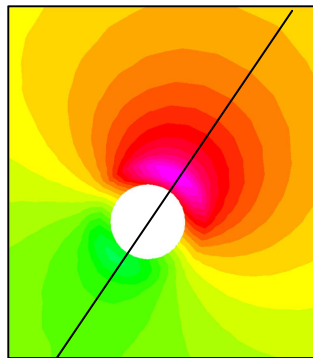


Ilustración 90: Dirección de las tensiones en el hueco superior del lado interior. Modelo 4.1

- Los valores máximos de tracción y mínimos de compresión en la barandilla de 2 pernos se acercan a la vertical (ángulos 0° y 180°), mientras que en la de 4 pernos se alejan unos 30° (ver gráficos 1-4).

- a) En ambos casos el aumento de carga afecta linealmente al incremento de las tensiones.
- b) Análisis de la influencia de un segundo perno, en cada lado, sobre la reducción de las tensiones alrededor del hueco:

Tensiones máximas y mínimas en el hueco (N/mm ²)			
Lado del panel	Borde del hueco	Barandilla de 2 pernos	Barandilla de 4 pernos
Interior	Superior	83,96	43,12
	Inferior	-66,17	-12,26
Exterior	Superior	-70,58	-36,71
	Inferior	54,28	7,70

Tabla 9: Tabla resumen de los valores máximos y mínimos de las tensiones en los huecos de las barandillas de 2 y 4 pernos, para una carga lineal de 1,6N/mm en el borde superior

- a) Las tensiones máximas que se producen en el borde superior descienden a la mitad, tanto en el lado interior como en el exterior del panel (ver tabla 10). En cambio en el borde inferior del lado exterior del panel la tensión máxima de tracción es 7 veces inferior en el panel de 4 pernos que en el de 2 y en el lado interior el valor mínimo de compresión es 5 veces menor.

Cociente entre las tensiones de la barandilla de 2 pernos y la de 4		
Lado	Borde del hueco	Cociente
Interior	Superior	2
	Inferior	5
Exterior	Superior	2
	Inferior	7

Tabla 10: Cociente entre las tensiones de la barandilla de 2 pernos y la de 4

- b) Para obtener resultados que ayuden a una mejor comprensión sobre como influye el segundo perno en la reducción de los esfuerzos en el hueco superior, habría que hacer una serie de simulación variando la altura a la que se coloca el segundo perno, como único parámetro de estudio. Puesto que en este trabajo el panel de 4 pernos se simula en todos los casos con una separación vertical entre ejes de pernos de 250mm, dicha investigación se propone para futuras investigaciones.
- c) La posición ideal desde un punto de vista técnico es aquella que genere las mismas tensiones máximas y mínimas en el borde superior e inferior en valor absoluto.
- d) Todas las curvas se cruzan aproximadamente en el cero
- Comparación de la barandilla de dos pernos con los programas ClearSight y Straus7:

En el programa ClearSight se ha conseguido simular el comportamiento de un vidrio laminado al contrario que en Straus7, donde el vidrio se comporta de forma monolítica, ya que como se ve en la figura derecha de la imagen 75, que representa la cara de la lámina de vidrio en contacto con el PVB, las tensiones alrededor del hueco son distintas de cero (color rojo y amarillo). Con Straus7 no se ha conseguido este efecto (ver ilustraciones 103 y 104), por tanto esta sección corresponde a la fibra neutra (F.N.) y carece de interés.

Las tensiones se distribuyen en la superficie del panel de forma similar en ambos programas, localizándose los máximos esfuerzos en las zonas superior e inferior.

Al comparar los resultados calculados por ambos programas se observan unas discrepancias considerables entre las tensiones máximas, siendo estos valores aproximadamente de ± 265 MPa en ClearSight y ± 60 MPa en Straus7. Esto se debe a que la simulación realizada con ClearSight considera que los nodos del hueco

tienen el movimiento restringido, con ánimo de simular el comportamiento de la junta del perno (ver último párrafo de la página 67 en bibliografía [19]) por ello “*los esfuerzos están sobreestimados*” en ClearSighty, según especifica el autor, lo que implica que los resultados de las tensiones no se pueden comparar entre ambos programas.

7.4. Fachada:

7.4.1. Características:

El proceso de introducción de datos para el panel de la fachada es análogo al ejemplo anterior.

- Geometría del panel:

1,4m de largo, 1,4m de alto, compuesto por dos láminas de vidrio de 8mm de espesor cada una y una capa intermedia de PVB de 0,76mm de espesor.

Hay cuatro pernos pasantes, uno en cada esquina, que distan de los bordes más próximos 200mm desde el eje del anclaje.

- Hipótesis de carga:

Todo el panel está sometido a una carga uniformemente repartida para la simulación del viento $q=1000 \text{ N/m}^2$ y se omite el peso propio.

- Propiedades de los materiales:

Los materiales que componen el panel tienen las mismas propiedades que los de la barandilla anterior.

- Características del mallado:

Las características del mallado son las mismas que para la barandilla.

7.4.2. Simulación del panel para fachada con ClearSight:

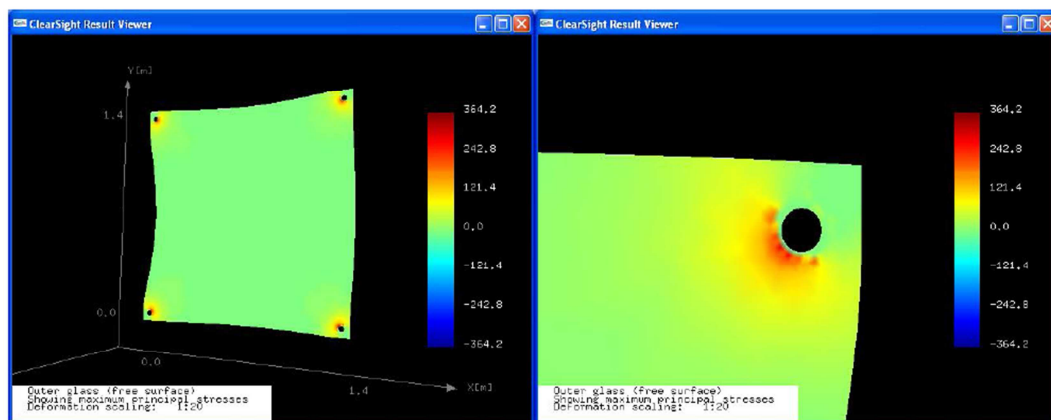


Ilustración 92: Esquema de esfuerzos de tensiones máximas J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 64

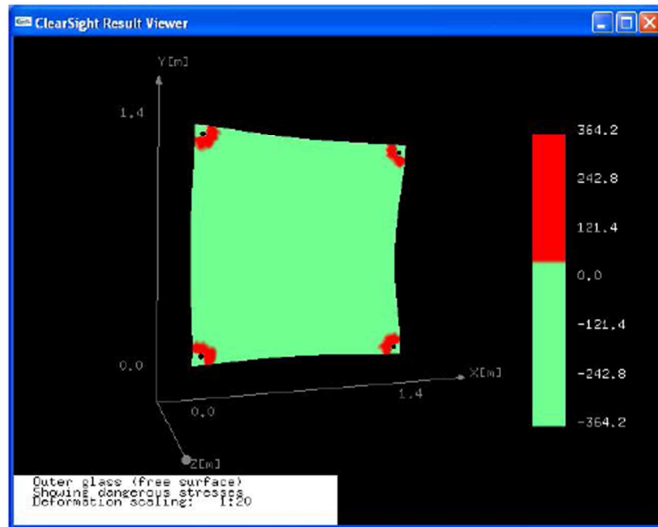


Ilustración 93: Esquema de esfuerzos de tensiones mayores a 50MPa. J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 64

El plano de estudio corresponde en todas las imágenes a la cara libre de la lámina de vidrio exterior, es decir, la que corresponde al plano donde se aplica la carga de presión de viento.

La distribución de las tensiones es simétrica en los cuatro vértices, lo que indica que no se ha considerado el peso propio.

El comportamiento del conjunto es muy similar al de una viga empotrada-empotrada con carga

uniformemente repartida. Esto significa que cuanto más amplia sea la distancia entre anclajes, tanto más pronunciada será la flexión del panel y mayores serán las tracciones y compresiones en las caras exteriores del panel en torno a los huecos.

- Conclusiones respecto a los resultados en ClearSight:

Según se explica en la tesis que desarrolla esta aplicación, el programa ClearSight es una herramienta en proceso de desarrollo y mejora por tanto los resultados obtenidos en la barandilla y la fachada no se corresponde exactamente a la realidad. Existen parámetros que según el autor es necesario modificar, mejorar y desarrollar más detenidamente para que la simulación se asemeje más a la realidad. Estos parámetros principalmente son:

Los nodos que componen el anillo interior de cada hueco para los pernos pasantes se han fijado de manera que la circunferencia sea indeformable, como explica el autor en el apartado "5.4 Discussions"³⁶ en su tesis. Esto, como se ve en la imagen de la perforación, conlleva que justo en el contorno del anillo el valor de las tensiones sea prácticamente cero (Ver ilustración 92). Por tanto es imprescindible depurar esta particularidad, para que la distribución de las tensiones entorno al taladro sean reales.

³⁶ J. Malmberg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 62

Para entender el comportamiento tensional y las deformaciones a las que el vidrio entorno a la perforación se ve sometido. (Ver apartado “6.2 Diseño de las perforaciones en vidrio estructural”, páginas 57-60)

7.4.3. Simulación de la fachada anterior con Straus7:

- Criterios empleados en la simulación:

Panel de 1400x1400mm² con cuatro pernos, uno en cada a esquina, con restricción de desplazamiento y giro en los 3 ejes. El panel está sometido a una carga de viento de 1000N/m², para lo cual se ha aplicado una carga perpendicular de presión con la opción “global pressure”, que garantiza que las cargas se apliquen siempre en la dirección del eje, es decir sin variar la dirección para mantener la perpendicularidad cuando el panel se deforma.

Como el modelo es simétrico en los ejes vertical y horizontal, los detalles de los huecos corresponden siempre al hueco inferior derecho visto desde el exterior o izquierdo del lado interior y se denominará hueco 1.

- Objeto de estudio:

Determinar la influencia de la distancia de los huecos a los lados más cercanos del panel. También podría estudiarse de forma análoga el índice λ en la generación de tensiones alrededor del hueco. El único parámetro que se ha variado en los modelos 5.1, 5.2 y 5.3 es la distancia del centro geométrico del perno a los laterales más próximos, siendo dichas distancias 200mm, 150mm y 100mm respectivamente. El radio del hueco se ha mantenido constante siendo de 18mm en todas las simulaciones.

Para consultar la mínima separación aconsejada entre el hueco y los lados del panel ver el “apartado 3.1.2.4.1: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio”, página 18.

$$\lambda_{5.1} = \frac{18}{200} = 0,09$$

$$\lambda_{5.2} = \frac{18}{150} = 0,12$$

$$\lambda_{5.3} = \frac{18}{100} = 0,18$$

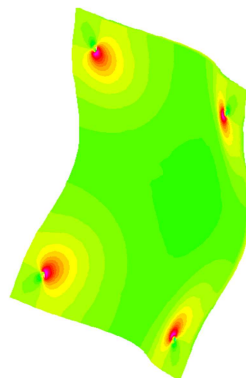


Ilustración 94: Vista en perspectiva desde el lado exterior. Deformación ampliada un 20% del modelo 5.2

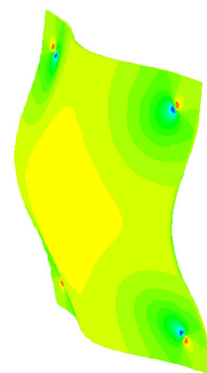


Ilustración 95: Vista en perspectiva desde el lado interior. Deformación ampliada un 20% del modelo 5.2

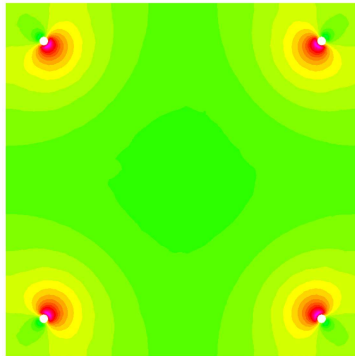


Ilustración 97. Vista frontal exterior del modelo 5.2

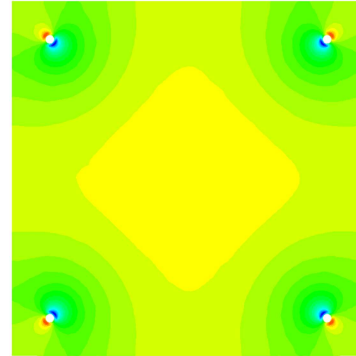


Ilustración 96: Vista frontal interior del modelo 5.2

- Gráficos comparativos entre los tres modelos:

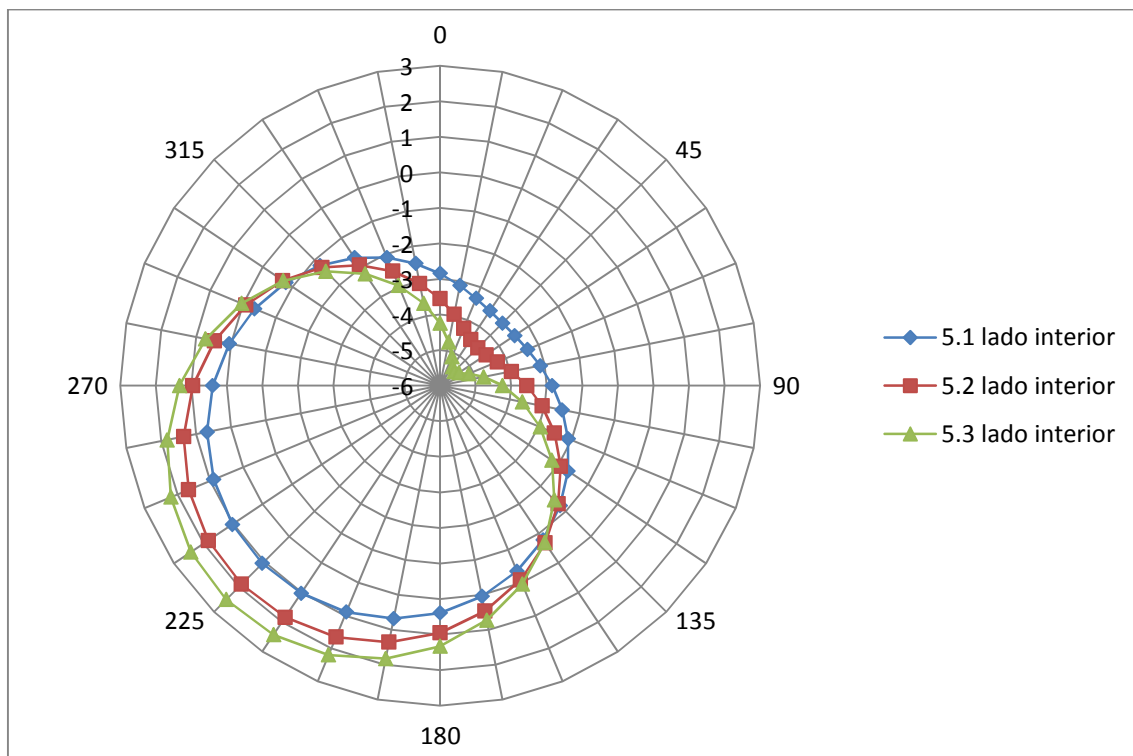


Gráfico 5: Comparación entre la distribución de tensiones en el contorno del hueco 1 en el lado interior

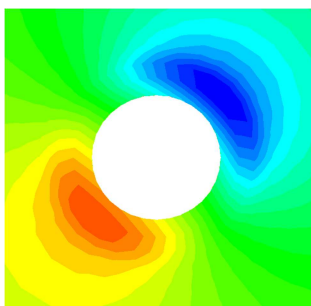


Ilustración 98: Detalle del lado interior del hueco 1 del modelo 5.2

La zona de interés es la de compresión, cuya sollicitación es una suma de la compresión producida por la flexión y la presión ejercida por el disco del perno. Las tensiones máximas y mínimas se encuentran en el eje $225^{\circ} - 45^{\circ}$, que es la diagonal del panel y los valores más cercanos a cero se encuentran próximos a la perpendicular de la diagonal pasando por el centro del hueco, en los ejes 135° y 315° .

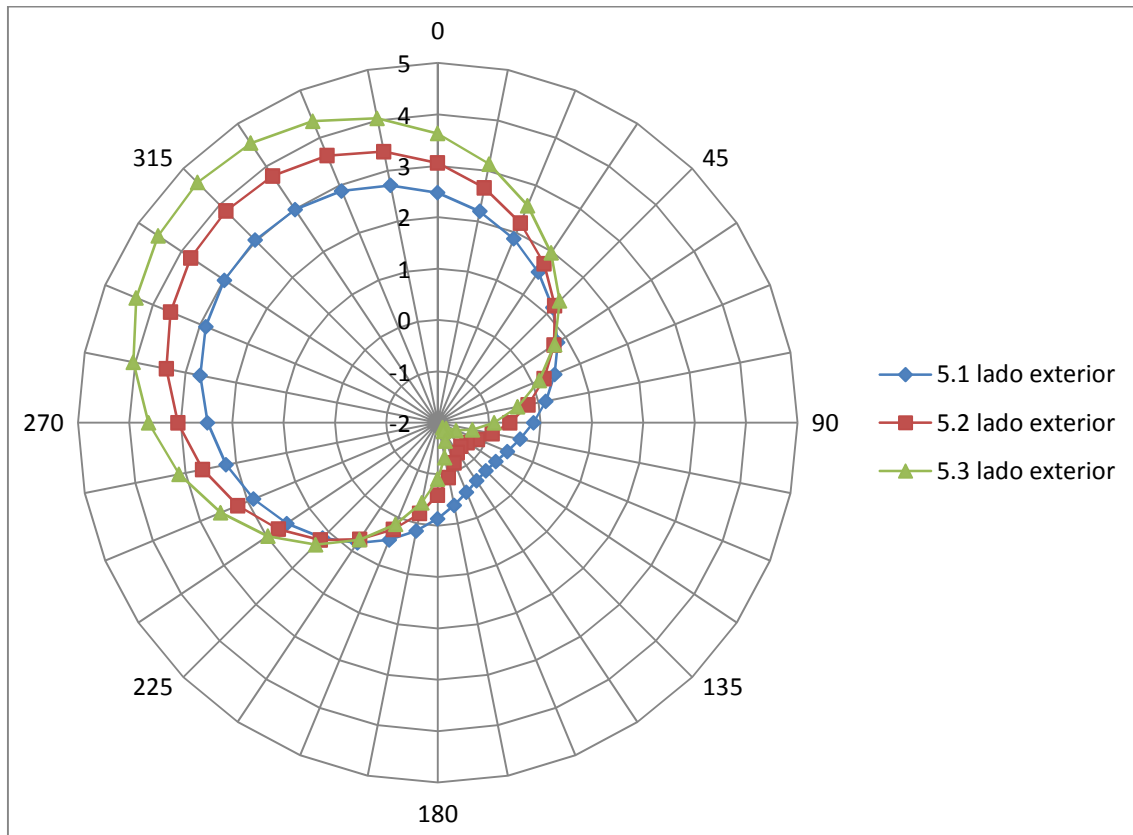


Gráfico 6: Comparación entre la distribución de tensiones en el contorno del hueco 1 en el lado exterior

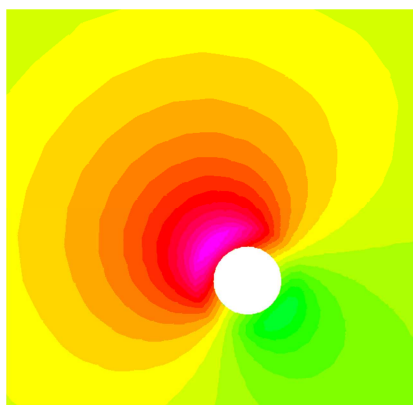


Ilustración 99: Detalle del lado exterior del hueco 1 del modelo 5.2

Estas tensiones corresponden al hueco anterior visto desde el lado opuesto.

Las tensiones de tracción son mucho mayores que las de compresión en valor absoluto. Además, el incremento de tensión entre las tres curvas tiende a ser constante en la zona de tracciones.

Por otro lado la distribución de tensiones es simétrica respecto a las tangentes del panel, que al ser cuadrado forman 45° con la vertical (eje 45° - 225° en el gráfico 5 y eje 315° - 135° en el gráfico 6).

- Comparación entre las tensiones en ambos lados (interior y exterior):

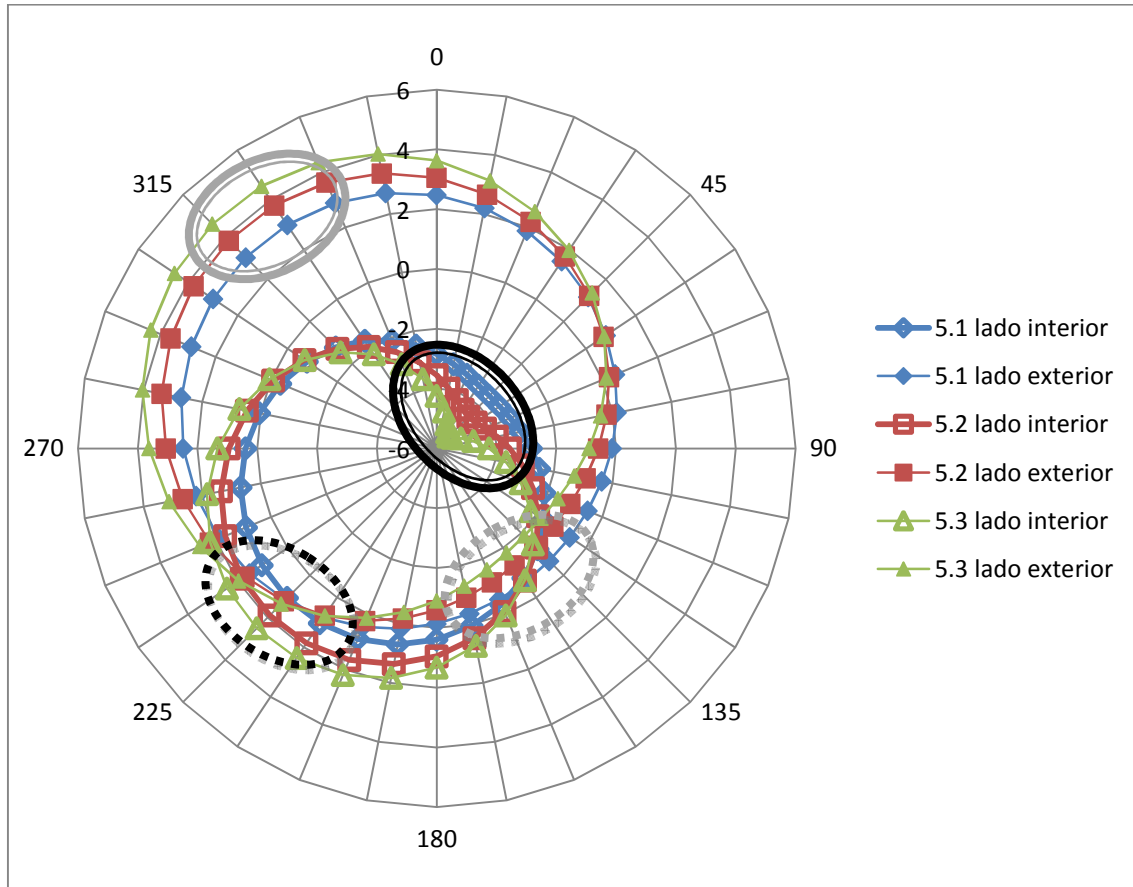


Gráfico 7: Comparación entre las tensiones en ambos lados

Para identificar fácilmente en las gráficas las zonas correspondientes a las dos ilustraciones inferiores se ha empleado una serie de óvalos. Los grises corresponden al lado exterior y los negros al lado interior. De la misma manera los dos óvalos de línea discontinua indican el sector inferior del hueco y los de línea continua indican el área superior, donde se generan las tensiones más altas de compresión y tracción, en valor absoluto.

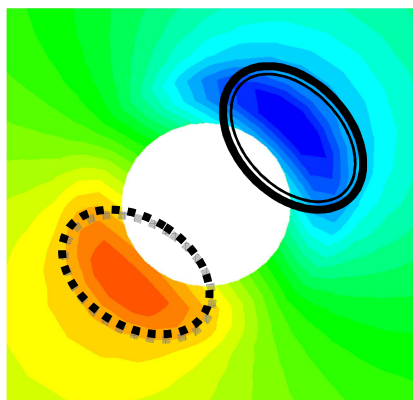


Ilustración 101: Detalle del lado interior del hueco 1 del modelo 5.2

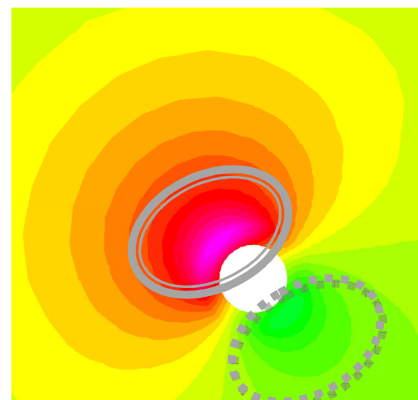


Ilustración 100: Detalle del lado exterior del hueco 1 del modelo 5.2

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

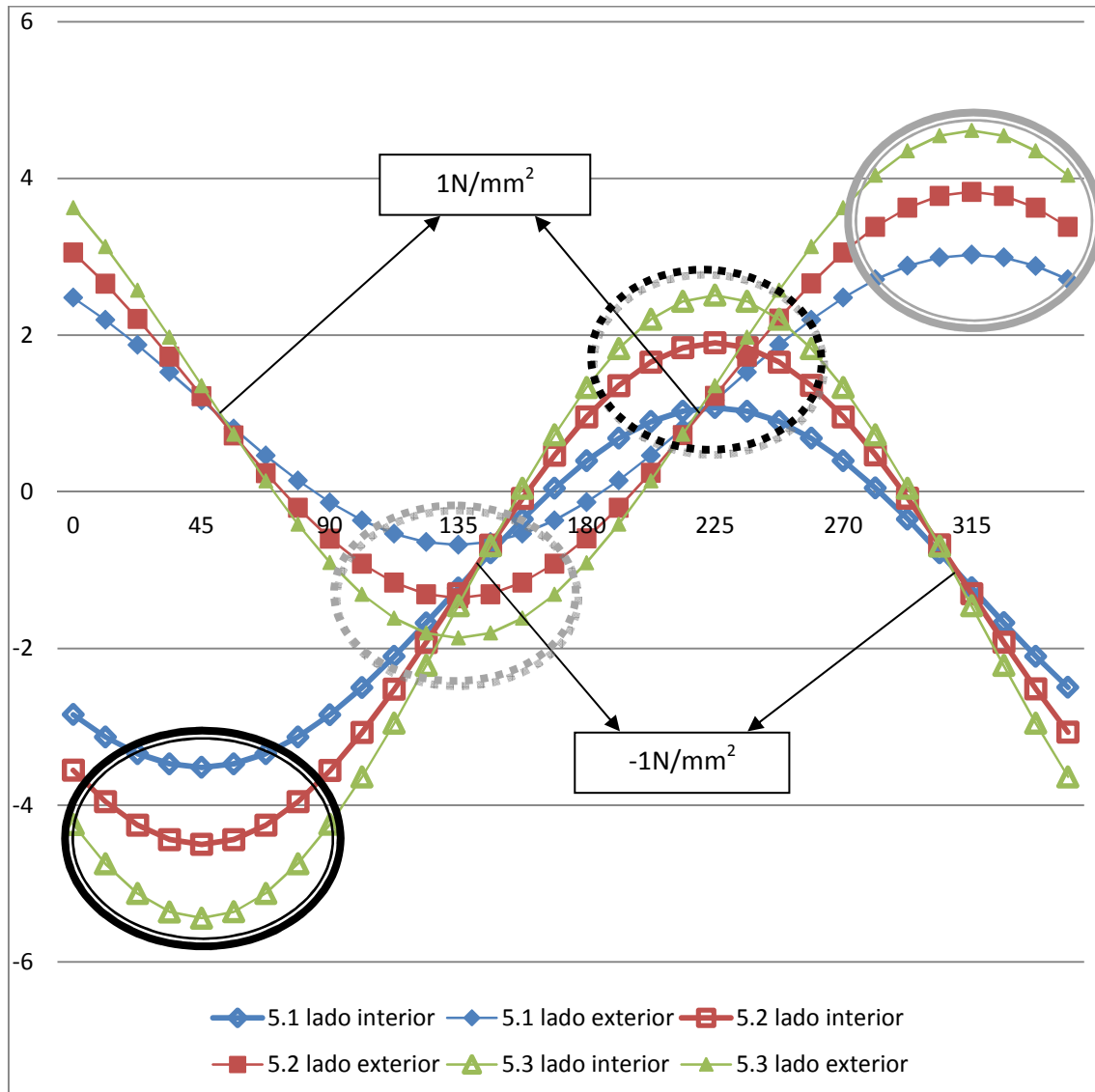


Gráfico 8: Comparación entre las tensiones en ambos lados

En este gráfico se visualiza mejor donde se producen las tensiones máximas y mínimas, cuales son los puntos de encuentro de las seis curvas y además permite distinguir si el incremento de tensión es constante.

Según la gráfica las tres curvas del lado interior coinciden en -1N/mm^2 , lo que significa que en esos dos puntos del hueco situados a aproximadamente 135° y 315° el índice λ , no influye. Por el contrario las tres curvas correspondientes al lado exterior coinciden en 1N/mm^2 .

El incremento de tensión se mantiene prácticamente constante en el borde superior del hueco, sin embargo en los óvalos de línea discontinua (lado inferior del hueco) la curva verde (5.3) está más próxima de la roja (5.2), que la azul (5.1)

- Comparación del panel para fachada con ClearSight y Struas7:

En este caso ocurre lo mismo que se vio en el caso de la barandilla de dos pernos. Aunque la distribución sea muy parecida en los dos programas, los valores que calculan son muy diferentes, por lo tanto este parámetro no puede compararse entre ambos programas.

- Observaciones:

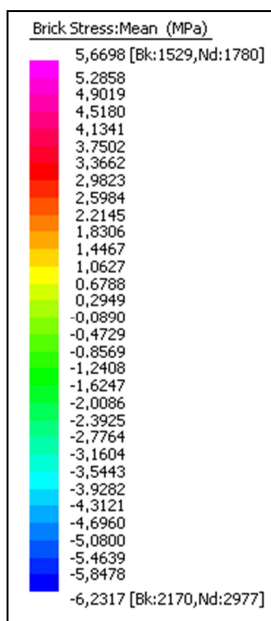


Ilustración 102: Valores de las tensiones para el modelo 5.2

La distribución de las tensiones a lo largo del panel se hace en forma de bulbos de descarga que crecen a medida que se alejan de los huecos.

Los detalles del hueco muestran que tanto en la zona de tracción como en la de compresión las zonas con tensiones más altas se localizan, no en el contorno del hueco, sino un poco por encima, en las zonas rosa y azul marino. Esto se debe por un lado al tipo de perno, cuyos discos de acero al impedir la libre deformación causan tensiones adicionales, propias de esta clase de anclajes y por otro lado a que se ha simplificado la simulación estimando que las propiedades de las juntas elásticas son las mismas en tracción y compresión. Por esto aunque en la realidad la superficie del disco de la que se separa el

panel no contribuye a la generación de tensiones, ya que las juntas entre el disco y el vidrio suelen ser arandelas de nylon que no trabajan a tracción en esta simulación no ocurre así.

Según las siguientes imágenes el modelo no simula un vidrio laminado, sino monolítico, por tanto para futuras investigaciones es necesario realizar las modificaciones oportunas a tal fin.

No obstante, analizando la distribución de tensiones a lo largo del espesor se ve claramente que las tensiones más altas de color rojo se localizan en los primeros 4mm (el mallado del espesor se ha dividido en cuatro capas de 4mm cada una). Esta es la razón por la que el vidrio templado resulta tan beneficioso para estas aplicaciones.

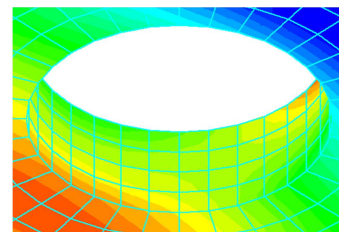


Ilustración 103: Comportamiento monolítico del espesor del panel de vidrio en el lado interior. Modelo 5.2

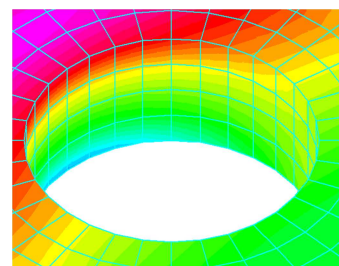


Ilustración 104: Comportamiento monolítico del espesor del panel de vidrio en el lado exterior. Modelo 5.2

7.5. Simulación de paneles cuadrados de vidrio con hueco central, sometidos a tracción:

Simulación de paneles cuadrados de vidrio con hueco central, sometidos a una carga uniformemente repartida de tracción en uno de sus lados, en el plano del panel y perpendicular al lado sobre el que se aplica. El movimiento queda restringido en el lado opuesto en todos sus ejes, para que el sistema quede equilibrado.

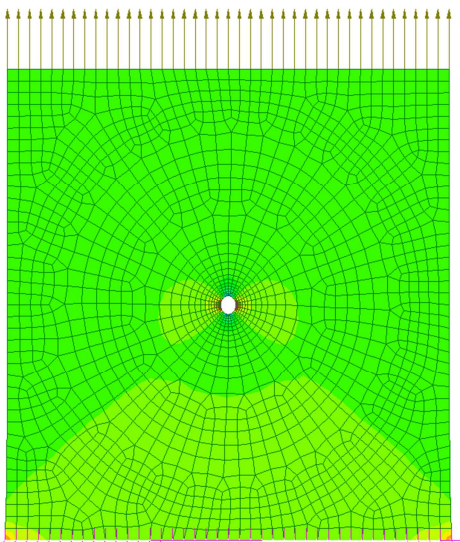


Ilustración 105: Panel de $1 \times 1 \text{ m}^2$ para los modelos 1.1; 1.2; 2.1 y 2.2

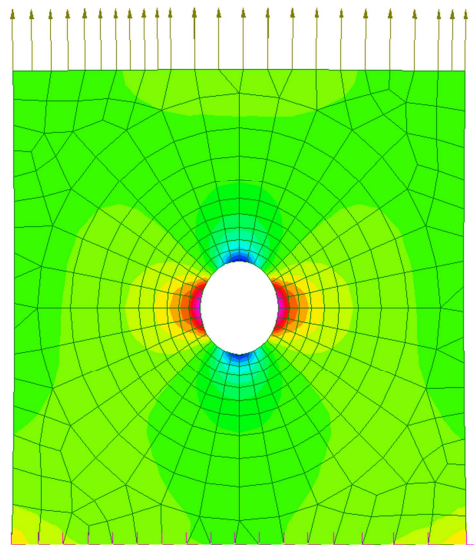


Ilustración 106: Panel de $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ para los modelos 2.9 y 2.10

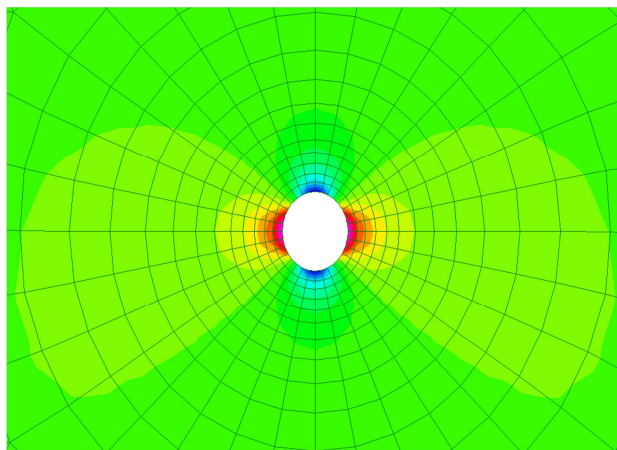


Ilustración 107: Detalle de hueco del panel cuadrado

Las zonas superior e inferior del hueco corresponden al área de compresiones, como consecuencia de la disminución del radio de curvatura. Las bandas izquierda y derecha indican las partes sometidas a tracción por un incremento del radio de curvatura del hueco. Esta deformación se conoce como “ovalización”.

Simulación de paneles cuadrados de espesor 8+8mm con hueco central de 36mm de diámetro					
Modelo	Dimensión del lado (m)	Cargas (N/mm ²)	Mallado(*)	σ máx. (N/mm ²)	σ mín. (N/mm ²)
1.1	1	21	Automático	20,421	-3,6879
1.2	1	40	Automático	38,90125	-7,01425
2.1	1	21	Manual	22,1715	-5,9934
2.2	1	40	Manual	42,24145	-11,4039
2.3	0,8	21	Manual	22,19635	-6,01885
2.4	0,8	40	Manual	42,3911	-11,55035
2.5	0,6	21	Manual	22,25	-6,0704
2.6	0,6	40	Manual	42,3911	-11,55035
2.7	0,4	21	Manual	22,40675	-6,21305
2.8	0,4	40	Manual	42,6898	-11,8216
2.9	0,2	21	Manual	23,28805	-6,99305
2.10	0,2	40	Manual	44,36925	-13,30425
(*) El mallado manual corresponde a la zona cercana al hueco.					

Tabla 11: Simulación de paneles cuadrados de espesor 8+8mm con hueco central de 36mm de diámetro

Los modelos 1.1 y 1.2 son iguales que las simulaciones 2.1 y 2.2, pero con un mallado alrededor del hueco automático y por tanto menos preciso, ya que el número de nodos es menor y su disposición es asimétrica respecto a los ejes vertical y horizontal que pasan por el centro geométrico del hueco del panel del vidrio.

El razonamiento del diseño del mallado manual se explica en el apartado “3.2.4.2.2. Mallado”, páginas 38-40, donde se dice que el número de radios debe ser 32 y la relación entre distancias entre los círculos concéntricos 1:1,5. Sin embargo utilizando esta relación los elementos bidimensionales pierden la forma aproximadamente cuadrada a medida que se alejan del centro del hueco y se alargan en sentido radial, por lo que no se ha utilizado la relación 1:1,5 y por el contrario se han dispuesto las circunferencias de forma aproximada, de manera que los elementos bidimensionales “plate” sean lo más cuadrado posible.

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

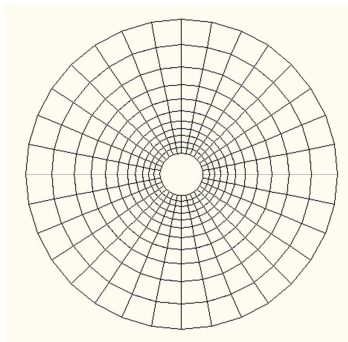


Ilustración 109: Mallado manual alrededor del hueco con 11 circunferencias concéntricas y 32 segmentos radiales. Producción propia

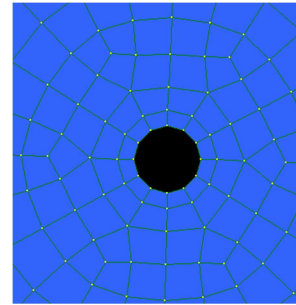


Ilustración 108: Mallado automático. Producción propia

	Tensiones máximas (T) y mínimas (C)			
	21N/mm2 (T)	21N/mm2 (C)	40N/mm2 (T)	40N/mm2 (C)
Panel de 1,0(*)	20,421	-3,6879	38,90125	-7,01425
	22,1715	-5,9934	42,24145	-11,4039
Panel de 0,8	22,19635	-6,01885	42,2888	-11,4522
Panel de 0,6	22,25	-6,0704	42,3911	-11,55035
Panel de 0,4	22,40675	-6,21305	42,6898	-11,8216
Panel de 0,2	23,28805	-6,99305	44,36925	-13,30425

(*) La fila superior corresponde al modelo con mallado automático.

Tabla 12: Tensiones máximas (T) y mínimas (C)

- Comparativa de las tensiones obtenidas alrededor del borde del hueco del panel de 1m de lado con mallado manual y automático:

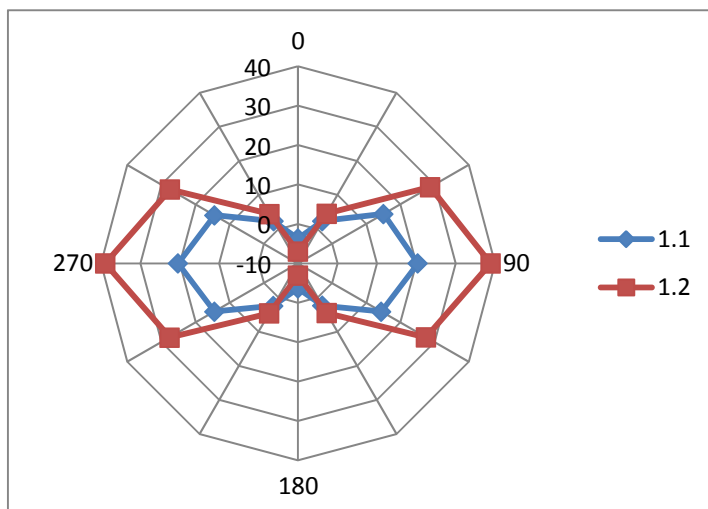


Gráfico 9: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco

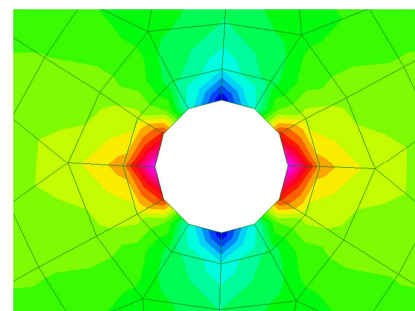


Ilustración 110: Detalle de hueco mallado automático en panel de 1x1m²

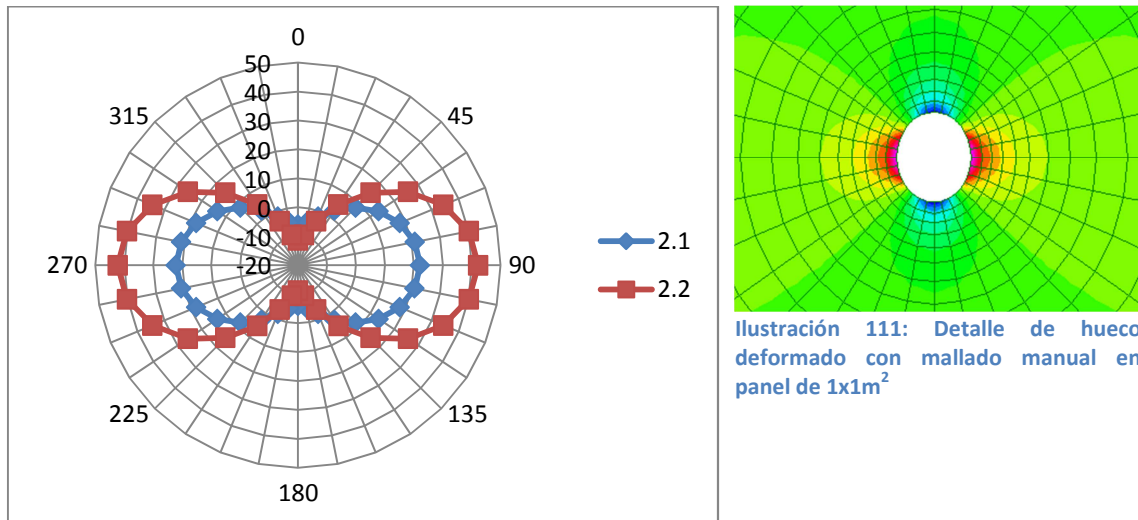


Gráfico 10: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco

Las tensiones máximas y mínimas para los gráficos 9 y 10 quedan reflejadas en las tablas 11 y 12, donde se visualiza la gran diferencia que existen en los resultados obtenidos en función del mallado. El arranque del mallado manual es parecido al manual, pero con un número de nodos mucho más reducido, siendo de 12 en el contorno del hueco con mallado automático y de 32 en el manual, casi 3 veces más. Además al aumentar la cantidad de puntos se suavizan los picos de las gráficas, mejorando la calidad de la información visual extraída a través de ellos.

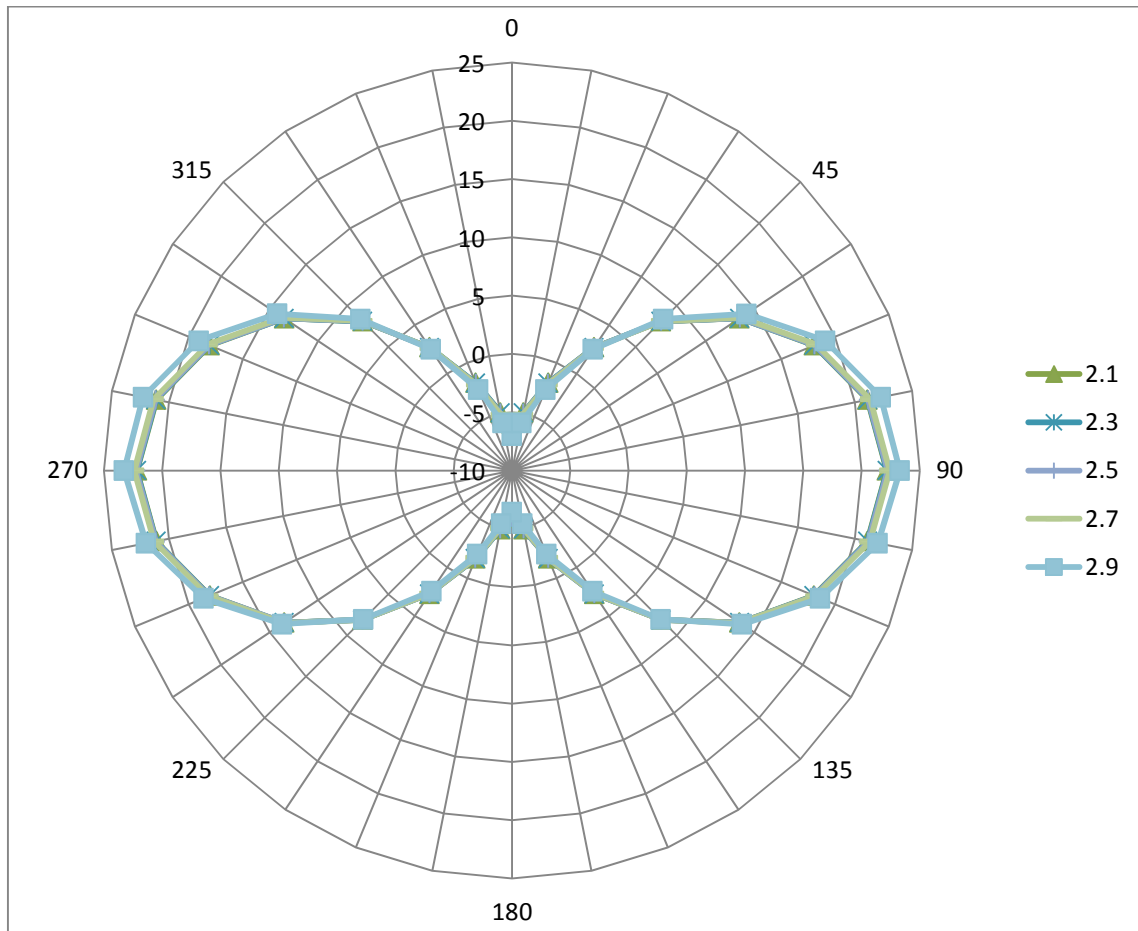
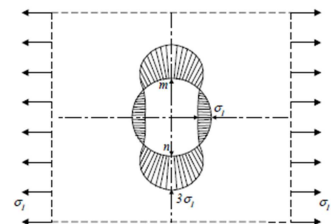


Gráfico 11: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco para todas las dimensiones de paneles con una carga de 21N/mm^2

- Los gráficos 11 y 12 indican que el aumento de las tensiones en los ángulos 0° , 90° , 180° y 270° es menor de lo esperado, siendo poco significativo.
- La distribución de las tensiones es simétrica con respecto a los ejes vertical y horizontal, formando bulbos de descarga que nacen en los ángulos 0° y 180° , donde se producen las tensiones mínimas de compresión.
- La superficie que abarca la zona de compresión es inferior que la de tracción debido a que se forman picos en lugar de una curva, por tanto la ilustración 112 es errónea (ver a la derecha).
- Los valores absolutos de las tensiones de compresión son aproximadamente 3 veces menores que los de tracción, ya que las zonas de compresión solo están sometidas a las tensiones generadas por



la deformación del panel y no por la carga [Ilustración 112: Ver ilustración 17, página 22](#)

aplicada a consecuencia de la formación de arcos de descarga. (ver “*apartado 3.1.2.4.3 Distribución de las tensiones en un panel de propiedades isotrópicas con un hueco circular*”, página 22)

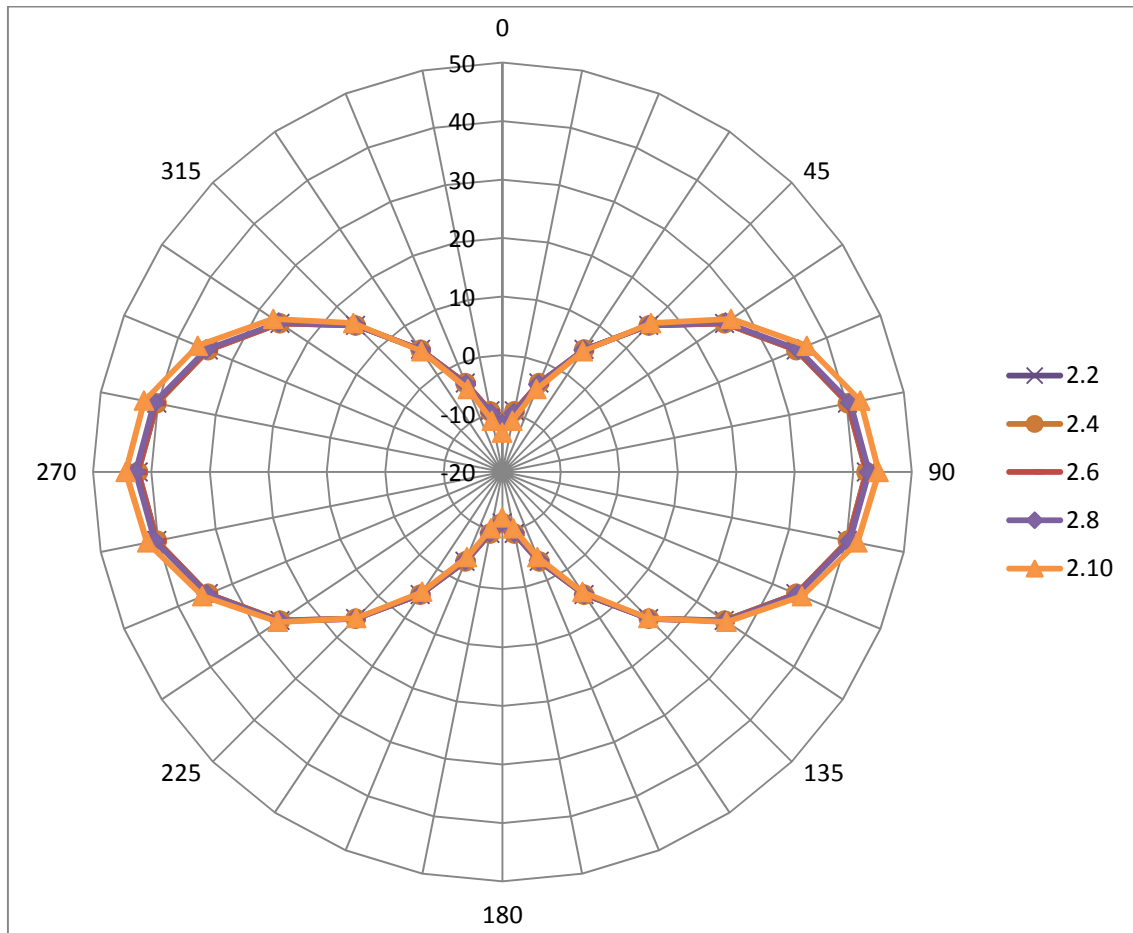


Gráfico 12: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco para todas las dimensiones de paneles con una carga de 40N/mm^2

El perímetro del arco de descarga corresponde a la Isolina igual a cero (ver modelos 1.1-2.10 en el anexo I).

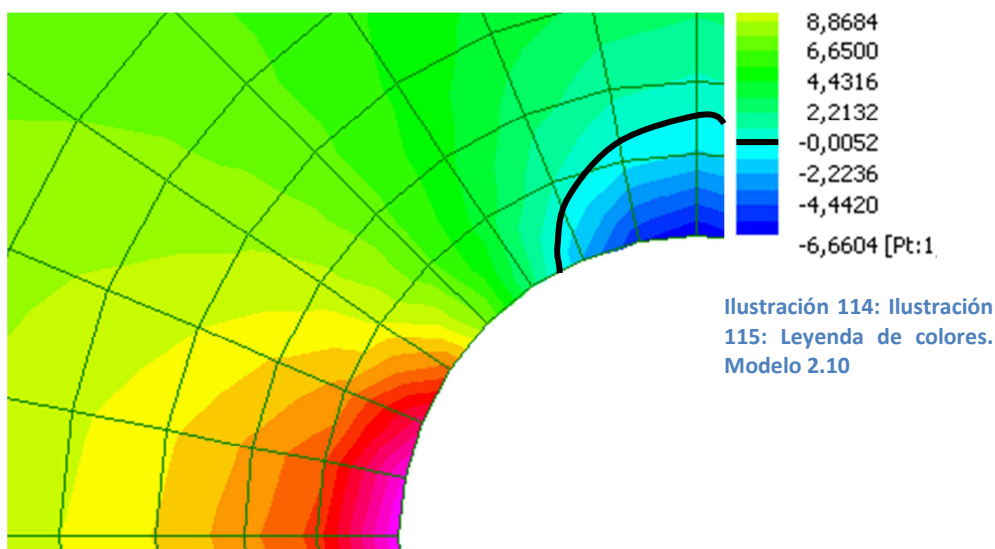


Ilustración 113: Detalle del arco de descarga en el hueco del modelo 2.10

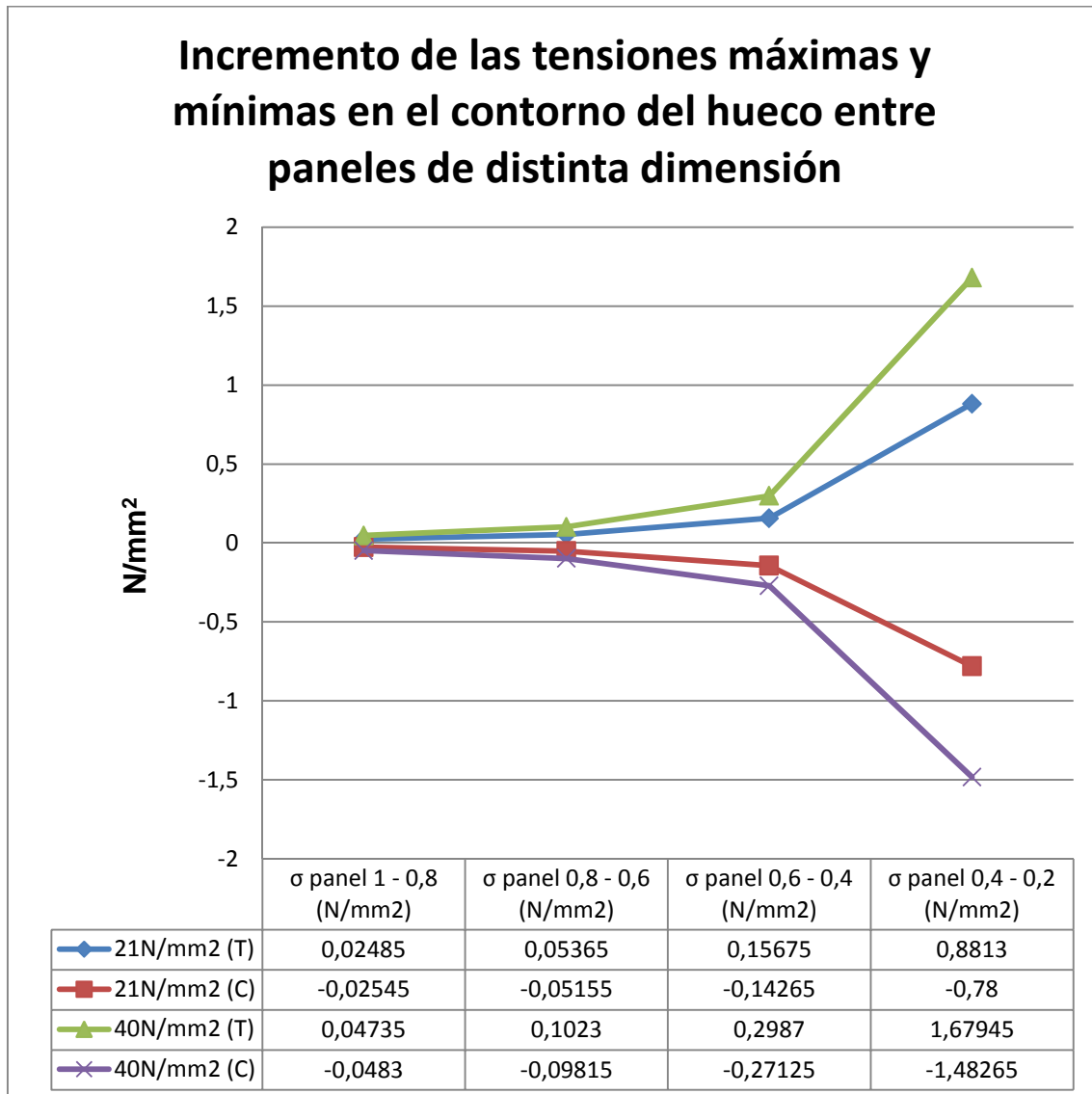


Gráfico 13: Incremento de las tensiones máximas y mínimas en el contorno del hueco entre paneles de distinta dimensión

El interés de este gráfico radica en observar que como influye la reducción de superficie del panel en las tensiones que se generan en el contorno del hueco.

Mediante esta gráfica se observa que los incrementos de tensión que se producen tanto en compresión como en tracción al disminuir la superficie del panel, no son lineales sino que tienen una tendencia exponencial.

Comparando los incrementos de las tensiones máximas de tracción (+) y las mínimas de compresión (-), de la gráfica anterior, se aprecia que los resultados obtenidos son muy similares en valor absoluto, aunque los valores de las tensiones de compresión tienden a ser ligeramente inferiores, que las de tracción, bajo los mismos parámetros.

Para tener una referencia de cuantas veces aumenta el valor del incremento de las tensiones en los puntos más solicitados del hueco (ángulos 0°, 90°, 180° y 270°) se ha elaborado una tabla con los cocientes de cada incremento de tensión entre el anterior.

	Índices de crecimiento (adimensional)			
	21N/mm2 (T)	21N/mm2 (C)	40N/mm2 (T)	40N/mm2 (C)
$\frac{\sigma_{panel\ 0,8 - 0,6}}{\sigma_{panel\ 0,1 - 0,8}}$	2,16	2,03	2,16	2,03
$\frac{\sigma_{panel\ 0,6 - 0,4}}{\sigma_{panel\ 0,8 - 0,6}}$	2,92	2,77	2,92	2,76
$\frac{\sigma_{panel\ 0,4 - 0,2}}{\sigma_{panel\ 0,6 - 0,4}}$	5,62	5,47	5,62	5,47

Tabla 13: Índices de crecimiento (adimensional). Producción propia

Estos datos indican que el aumento de la carga no modifica la tendencia de crecimiento de las tensiones. Sin embargo existe una ligera variación entre los resultados de compresión y tracción, siendo ligeramente inferior en todos los casos la tensión de compresión.

Este tipo de análisis aporta información muy valiosa acerca de cual es la relación ideal entre el diámetro del hueco y la dimensión de los lados. Todo ello para alejarse de las dimensiones a partir de las cuales las tensiones en el borde del hueco se disparan.

Comparación de la tensión uniforme que se produce en el panel con las tensiones máximas de tracción y mínimas de compresión:

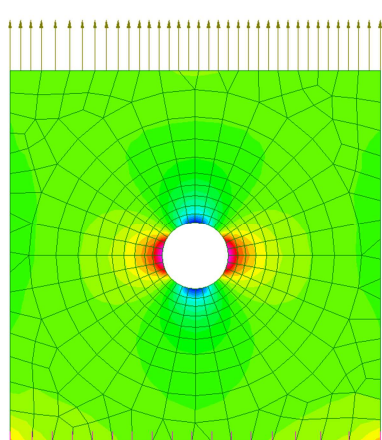


Ilustración 117: Modelo 2.10

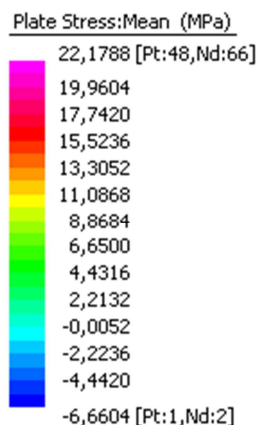


Ilustración 116: Tensiones del modelo 2.10

22,17N/mm² es aproximadamente 3 veces mayor que 6,65N/mm², mientras que -6,66N/mm² en valor absoluto es aproximadamente igual a 6,65N/mm². Por lo que la equivalencia de las tensiones más altas en tracción y compresión es de 3 y -1 respectivamente en relación al esfuerzo uniforme al que está sometido el panel.

(Ver “apartado 3.1.2.4.3: Distribución de las tensiones en un panel de propiedades isotrópicas con un hueco circular”, página 22).

8. CONCLUSIONES

Conclusiones generales:

- En todas las simulaciones los esfuerzos más altos de tracción y compresión en cada panel se localizan en la superficie del vidrio en contacto con el disco del perno y no en el borde del hueco. No obstante, en la realidad esto solo ocurre para las zonas comprimidas (ver *“apartado 7.2: Características y parámetros comunes, subapartado 2: Condiciones de contacto y restricciones”*, página 66), ya que las juntas prefabricadas de nylon (u otro material elástico) no trabajan a tracción. Por tanto la máxima tensión de tracción que se genera en el borde del hueco es el valor de mayor interés, debido a que los paneles de vidrio siempre rompen del lado de las tracciones (ver *“apartado 5.1: estudio por autores sobre la fisuración”*, páginas 52-55).
- Según las imágenes 103 y 104 de la página 90, las tensiones máximas de tracción ocurren en los primeros 4mm de sección del panel, por esta razón es aconsejable el uso de vidrios con tratamiento térmico (termoendurecido o templado), que reducen la posibilidad de rotura por esfuerzos de tracción.
- En la comparativa entre los programas ClearSight y Straus7 se observa que los resultados de las tensiones máximas difieren demasiado como para poder compararse, siendo dichos valores en el caso de la barandilla de 2 pernos aproximadamente $\pm 265 \text{MPa}$ (N/mm^2) en ClearSight y $\pm 60 \text{MPa}$ en Straus7. Esto no se debe a errores de cálculo, sino a que como se explica en el apartado de conclusiones del trabajo de investigación que aparece en bibliografía [19] (ver último párrafo, página 67 de dicho trabajo) se ha considerado que no existe deformación en los nodos que configuran el hueco. Por lo tanto según el autor Jens Malmberg, los esfuerzos obtenidos están sobreestimados y es necesario efectuar las oportunas modificaciones en dicho modelo, para que se asemeje más al comportamiento real.
- Comparando la distribución de las tensiones a nivel general entre ambos programas se aprecia una tendencia similar tanto en la barandilla de dos pernos (1 en cada esquina) como en el panel de fachada, ya que los valores máximos se localizan para cada caso en la misma zona independientemente de con que programa se ha simulado. En cambio a nivel particular, si se analiza únicamente el contorno de los huecos se aprecia que debido a la restricción existente en el mismo, según el programa ClearSight, como se explica en el punto anterior, se forma

alrededor del hueco una especie de aro (ver detalle del hueco en la ilustración 92) con tensiones menores de las que hay en la realidad. Las simulaciones realizadas con Straus7 no incluyen estas restricciones por tanto los resultados se asemejan más a la realidad.

Conclusiones del apartado 7.3: Barandilla de dos pernos:

- Las tensiones que se producen en el borde superior son entre un 27% y un 30% mayores que en el borde inferior.
- Para las barandillas de 2 y 4 pernos, el aumento de la carga lineal en el canto superior del panel afecta linealmente al aumento de tensiones en el borde del hueco, es decir el doble de carga genera el doble de tensión.

Conclusiones sobre el apartado 7.3: Barandilla de cuatro pernos:

- Las tensiones en el borde superior del hueco de los pernos superiores son entre 3,5 y 4,75 veces mayores que en el borde inferior de dichos huecos
- Según asciende la posición del segundo perno en el eje vertical (Y), más se aleja de la vertical el eje que une los puntos con las tensiones más altas. (Ver ilustraciones 90 y 91, página 81)
- El empleo de un segundo perno en cada lado reduce considerablemente las tensiones del perno superior en la barandilla de 4 pernos con respecto a la barandilla de 2 pernos. En el borde superior del hueco los esfuerzos descienden a la mitad y en el borde inferior entre 5 y 7 veces. Se estima que en función de la posición en el eje vertical esta proporción puede mejorar o empeorar. Cuanto menor sea la distancia entre ambos pernos, más semejante será el comportamiento a la barandilla de 2 pernos. La posición ideal desde un punto de vista técnico es aquella que genere las mismas tensiones máximas de tracción y mínimas de compresión en el borde superior e inferior. De esta forma se equilibra el reparto de esfuerzos y se evita la aparición de picos en las tensiones que favorecen la rotura frágil del panel en las zonas de tracción.

Conclusiones del apartado 7.4: Paneles para fachada:

- Las tensiones máximas en el contorno del hueco ocurren en los puntos de intersección de este con la diagonal del panel. Hay que considerar que no se ha tenido en cuenta la fuerza de la gravedad, por lo tanto en este sentido los resultados obtenidos en la simulación reproducen más fielmente el comportamiento de un panel en posición horizontal que uno vertical.

- Los esfuerzos más próximos a cero que se produce en el borde del hueco es equivalente a la carga que se aplica de 1000N/m^2 ($0,001\text{N/mm}^2$), siendo de 1N/mm^2 y -1N/mm^2 , atendiendo a los resultados del grafico 8 (página 89)

Conclusiones sobre el apartado 7.5: Paneles cuadrados:

- La diferencia en las tensiones en el hueco central en función de la reducción de la superficie del panel es muy reducida, como se observa en las gráficas 11 y 12. Además los resultados obtenidos en dichas gráficas demuestran la influencia del arco de descarga que se produce en los ángulos 0° y 180° (bordes superior e inferior respectivamente), ya que los valores en estas áreas son 3 veces inferior que en los ángulos 90° y 270° donde las tensiones se concentran.
- Aunque el incremento de tensión sea muy ligero cuando se disminuye la superficie del panel, analizando los valores de los incrementos, según la gráfica 13 (página 97) se percibe que dichos incrementos forman una curva exponencial. Por tanto cuando el diámetro del hueco es muy próximo al lado del panel, las tensiones de tracción deberían adquirir valores muy altos.
- Las compresiones son consecuencia de la deformación del panel y las sollicitaciones de tracciones son una suma de la carga aplicada al panel y la deformación de este.
- La tensión máxima de tracción tiende a ser 3 veces mayor que la tensión a la que está sometido el resto del panel, mientras que el valor mínimo de compresión tiende a ser igual y de signo contrario.

9. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

- 9.1. Análisis de grampones con elementos finitos.
- 9.2. Análisis de vigas de cables para fachadas de vidrio con elementos finitos.
- 9.3. Estudiar el comportamiento de la lámina de PVB en caso de rotura del vidrio.
- 9.4. Influencia de las microfisuras y desperfectos en la resistencia a tracción de los paneles de vidrio.
- 9.5. Simulación de fachadas de vidrio con doble acristalamiento térmico en Straus7.
- 9.6. Simulación en ABAQUS.
- 9.7. Estudio de los aspectos de seguridad en el diseño de las estructuras de vidrio.
- 9.8. Columnas de vidrio laminado.
- 9.9. Vigas de vidrio laminado.
- 9.10. Diseño de aplicaciones específicas mediante el lenguaje de programación Python (www.python.org).
- 9.11. Mejora del modelo ensayado con strauss7 en el apartado 7, para conseguir el efecto de un vidrio laminado y que las juntas entre el acero y el vidrio solo funcionen a compresión.
- 9.12. Análisis de los apartados 7.3, 7.4 y 7.5 con pernos de cabeza troncocónica (avellanados)
- 9.13. Realizar el mismo análisis del apartado 7.5 colocando un perno en el hueco.
- 9.14. Comparativa de los resultados del apartado 7, para pernos cilíndricos y avellanados.

- 9.15. Estudiar otros parámetros en el apartado 7, como diámetro de perno, holgura, más materiales para las juntas elásticas, espesor de la junta elástica, espesor del vidrio, etc.
- 9.16. Investigar como influye la posición de un segundo perno en el eje vertical en la distribución de las tensiones alrededor del hueco (ver apartado 7.3)
- 9.17. Ensayos en laboratorio de carga y rotura de paneles de vidrio laminado.
- 9.18. Análisis comparado de paneles de vidrio calculados con elementos finitos y los resultados obtenidos de ensayos en laboratorio.

10. NORMATIVA ESPECÍFICA

10.1. Normativa europea:

EN 12150-1: Norma europea para vidrio de seguridad templado (thermally toughened soda lime silicate safety glass)

EN 12150-2:2004: Ensayo de la compresión superficial

EN 1863-1: Norma europea para vidrio de seguridad termoendurecido (heat strengthened soda lime silicate safety glass)

DIN EN 1288-1 a 5: Resistencia a flexión de paneles de vidrio

prEN 13474: Vidrio para la edificación. Diseño de los acristalamientos. Parte 1: Base general de cálculo

- **Normativa para vidrio laminado de seguridad:**

EN ISO 12543

EN 12600: Ensayo con péndulo para describir el comportamiento del vidrio en caso de impacto.

EN 356: Describe los ensayos y define la clasificación de la resistencia de los vidrios de seguridad contra ataques humanos o vandálicos.

EN 1063 y EN 13541: Regulan las prestaciones que requieren los vidrios resistentes a explosiones y balas.

DIN EN 1990 (Eurocode 0):2002-10: Bases del diseño estructural

10.2. Normativa española

UNE EN 1288-3:2000: Vidrio para la edificación. Determinación de la resistencia a flexión del vidrio

10.3. Normativa alemana

DIN 18008: Para el diseño de elementos de vidrio

E DIN 18008-3: Design standard for point supported glazing

eTRPV 2005: "Technical rules for design and implementation of point supported glazing"

10.4. Normativa internacional

ASTM E 1300-02: Standard Practice for determining Load Resistance of Glass in Buildings, 2002.

11. BIBLIOGRAFÍA

11.1. Bibliografía relacionada con la seguridad:

- [1] Mrs. Barbara Siebert. "*Safety aspects of point-fixed glass constructions*". Disponible en internet: <http://www.glassfiles.com/library/11/article1215.htm> [Consulta 09/07/2011]

11.2. Bibliografía relacionada con el diseño estructural:

- [2] Benjamin Fay. "*Designing Glass Holes For Bearing: An Approach from First Principles Adapted for the Practising Structural Glass Engineer*". Disponible en internet: <http://www.glassfiles.com/library/article.php?id=324&search=glass+holes&page=1> [Consulta 10/07/2011]
- [3] C. Bength. *Bolt Fixings in Toughened Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2005).
- [4] Conceptos básicos de la mecánica de fracturas. Abril-2010.p-3. <http://www.inq.unlp.edu.ar/aeron/catedras/archivos/Mecanica%20de%20Fractura%202010rev01.pdf>
- [5] Francesc Arbós Bellapart y Albert Vidal Majoral. *Lafijación puntual de vidrios en la Arquitectura*. [Consulta 17/07/2011]
- [6] Griffith A. A.: The phenomena of rupture and flow of solids", Theoret. Trans. Royal Society of London, 1920, 221, p163-179
- [7] Iris Maniatis. *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads*. Doctoral thesis, Technische Universität München, (2006)
- [8] K. Hellan, *Introduction to Fracture Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1984).
- [9] Maria Fröling and Kent Persson. "*Design bolt fixed laminated glass with stress concentration factors*".

- [10] Matthias Haldimann, Andreas Luible and Mauro Overend, *Structural use of glass*, Structural engineering document SED, IABSE, Zürich, 2008.
- [11] Mauro Overend e Iris Maniatis. *The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections*. Septiembre-2007. [http://www-g.eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatis_%20paper.pdf](http://www.g.eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/overend&maniatis_%20paper.pdf)
- [12] M. Overend. *Recent developments in design methods for glass structures*. Diciembre-2009
- [13] M. Overend. *Optimising connections in structural glass*.
- [14] Mecánica de Fractura Lineal Elástica.p. 1 y 5:
http://materias.fi.uba.ar/6716/Mecanica%20de%20fractura%20lineal%20-%20elastica_1.pdf
- [15] The Institution of Structural Engineers, *Structural use of glass in buildings*, London 1999.
- [16] Timoshenko, S.O., Goodier, J.N. *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York 1970.
- [17] Wurm J.: *Glass Structures*, Birkhauser, 2007, ISBN 978-3-7643-7608-6

11.3. Bibliografía relacionada con artículos específicos sobre elementos finitos:

- [18] Jaime Santa Cruz Astorqui. (06/09/2010). *La simulación por elementos finitos. Manual de Straus7*. EU Arquitectura Técnica-UPM.
[Consulta 15/07/2011]
- [19] J. Malmborg. *A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass*. Master's thesis, Lund University of Technology, (2006).
- [20] Lee P-S., Bathe K-J., (2004) *Development of MITC isotropic triangular shell finite elements*. Disponible en internet:

http://web.mit.edu/kjb/www/Principal_Publications/Development_of_MITC_Isotropic_Triangular_Shell_Finite_Elements.pdf

- [21] Shewschuk J., Triangle - A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and De-launay Triangulator. <http://www.cs.cmu.edu/quake/triangle.html>

11.4. Bibliografía relacionada con normativa:

- [22] EN 1990-Eurocódigo: Bases del diseño estructural
- [23] Purpose and justification for new design standards regarding the use of glass products in civil engineering works. Disponible en internet: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/EUR22856EN>
[Consulta 13/07/2011]
- [24] Sedlacek, G., (2005) *Proposal for the content of new Eurocode on design of glass structures. Part 1: Basis of design - design of glass panes.*
[Consulta 13/07/2011]

11.5. Ilustraciones:

- Ilustración 1: Palm House in Kew Gardens, London. 1845-1848.
http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Kew_Gardens_Palm_House,_London_-_July_2009.jpg 10
- Ilustración 2: “Palm House at Bicton Gardens”, 1843.
<http://www.gardenworldimages.com/Details.aspx?ID=4463&TypeID=1&searchtype=&contributor=0&licenses=1,2&sort=REL&cdoonly=False&mronly=False.....> 10
- Ilustración 3: Galería Vittorio Emmanuele II. <http://us.fotolia.com/id/1032584410>
- Ilustración 4: Foster & Partners, cúpula de Reichstag, Berlín, 1998.
http://www.heraldo.es/noticias/internacional/cierran_cupula_del_reichstag_ante_posible_atentado.html 10
- Ilustración 5: Edificio Seagram.
<http://www.disenoyarquitectura.net/2009/03/edificio-seagram-1954-nueva-york-mies.html> 11
- Ilustración 6: Resistencia en los bordes del panel..... 14
- Ilustración 7: The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p.5, ver referencia 6 15

Ilustración 8: Paper. Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 22.....	16
Ilustración 9: Comparativa entre vidrio recocido, termoendurecido y templado. <i>Glass Panel under Shear Loading-Use of Glass Envelopes in Building stabilization</i> . p.7.....	17
Ilustración 10: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio. Iris Maniatis. <i>Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-plane Loads</i> . p.14	18
Ilustración 11: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 1.	18
Ilustración 12: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 2.	19
Ilustración 13: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 3.	19
Ilustración 14: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 4	19
Ilustración 15: Distribución del pretensado térmico en los paneles de vidrio: Zona 4	19
Ilustración 16: Distribución de las tensiones hasta m y n	22
Ilustración 17: Distribución de las tensiones en el borde del taladro	22
Ilustración 18: Hueco en un panel de dimensiones infinitas. Definición de tensiones en una sección cualquiera. Distribución de tensiones en el panel en la línea perpendicular a las cargas que pasa por el centro del hueco	23
Ilustración 19: Distribución de las tensiones en el segmento perpendicular a las cargas, que pasa por el centro del hueco.	24
Ilustración 20: Factor de concentración de tensiones (SCF) en función del índice $a/b=\lambda$. Ver referencia 15, tesis de Iris Maniatis, p 48.	26
Ilustración 21: Tensión de tracción máxima en función del radio a y la distancia b (1/2 del ancho). Ver referencia 15, tesis de Iris Maniatis, p 48.....	26
Ilustración 22: Distribución de las tensiones en el canto del hueco al aplicar una carga centrada	28
Ilustración 23: Distribución de las tensiones en el canto del hueco al aplicar una carga descentrada.....	28
Ilustración 24: Countersunk fixing. Manual del programa SJ-Mepla.....	30
Ilustración 25: Disk fixing. Manual del programa SJ-Mepla.....	31
Ilustración 26: Clamped fixing. Manual del programa SJ-Mepla.....	31
Ilustración 27: Bonded disk fixing	32
Ilustración 28: Una de las marquesinas de entrada a la Ciudad Financiera del BSCH. La fijación puntual de vidrios en Arquitectura. Bellapart. p 8	32
Ilustración 29: Procedimiento de relleno del anclaje cilíndrico con mortero híbrido. Tesis de Iris Maniatis, p 31.....	34

Ilustración 30: Rotura del panel de vidrio templado. Tesis de Iris Maniatis, p 31.	34
Ilustración 31: Elementos básicos de un mayado. Elementos Beam/1D, Plante/2D y Brick/3D	38
Ilustración 32: Mallado con un hueco circular. La malla está refinada cerca del hueco. J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 29	39
Ilustración 33: Comparación de mallados. The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p. 13	39
Ilustración 34: mallado alrededor del hueco. The influence of finite element modelling parameters on the stress distribution in bolted glass connections. p. 13	40
Ilustración 35: Introducción de los datos geométricos	42
Ilustración 36: Detalle de la geometría de la barandilla	42
Ilustración 37: Propiedades de los materiales	42
Ilustración 38: Unidades de medida	43
Ilustración 39: Introducción de las características de los anclajes	43
Ilustración 40: Barandilla con dos anclajes	44
Ilustración 41: Carga lineal	44
Ilustración 42: Barandilla sometida a una carga lineal igual a 0.8 N/mm	45
Ilustración 43: Opciones relativas al cálculo	45
Ilustración 44: detalle de perno de disco. Producción propia	46
Ilustración 45: Mallado de la barandilla. Producción propia	46
Ilustración 46: Detalle de marquesina (canopy)	47
Ilustración 47: Simulación de resistencia a impacto según EN 12600	47
Ilustración 48: http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EM03603M.pdf	53
Ilustración 49: Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 20	54
Ilustración 50: Recent development in design methods for glass structures. The Structural Engineer 88. p 22	55
Ilustración 51: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 6	55
Ilustración 52: Deformación geométrica. Design Glass Holes for Bearing	57
Ilustración 53: Distribución de tensiones. Design Glass Holes for Bearing	58
Ilustración 54: Rotura de placa de vidrio. Design Glass Holes for Bearing	58
Ilustración 55: Distribución radial de tensiones (Reibner boundary conditions). Design Glass Holes for Bearing	59
Ilustración 56: Tensión tangencial. Design Glass Holes for Bearing	59

Ilustración 57: Caso 3. Tensión tangencial en ambos lado.	60
Ilustración 58: Caso 2. Tensión de compresión en el hueco	60
Ilustración 59: Caso 1. Tensión de tracción en el hueco	60
Ilustración 60: Tensión tangencial en un lado	60
Ilustración 61: Hueco en un panel traccionado.....	60
Ilustración 62: Pernos de conexión	61
Ilustración 63: Esfuerzos alrededor del contorno del hueco del panel, con distintos materiales para la junta elástica.....	62
Ilustración 64: Esfuerzos alrededor del contorno del hueco del panel, con distintas holguras	63
Ilustración 65: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 21	67
Ilustración 66: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 22	68
Ilustración 67: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 23.....	69
Ilustración 68: Dimensiones del panel de vidrio. J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 24.....	70
Ilustración 69: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 24	71
Ilustración 70: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 25	72
Ilustración 71: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 31	72
Ilustración 72: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 31	73
Ilustración 73: denominación de cada cara del panel.....	73
Ilustración 74: J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 31	73
Ilustración 75: Esquema de esfuerzos de tensiones máximas J. Malmborg. <i>A Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 63.....	74

Ilustración 76: Producción propia	74
Ilustración 77: Producción propia	75
Ilustración 78: Producción propia	75
Ilustración 79: Leyenda de colores (N/mm ²).....	76
Ilustración 80: Vista frontal desde el lado exterior. Modelo 3.1	76
Ilustración 81: Vista frontal desde el lado interior. Modelo 3.1	76
Ilustración 82: Detalle del hueco exterior. Modelo 3.1	76
Ilustración 83: Detalle del hueco interior. Modelo 3.1	76
Ilustración 84: Barandilla de vidrio con dos pernos en cada esquina inferior.	
Maria Fröling. <i>Strength Design Methods for Laminated Glass</i>	78
Ilustración 85: Leyenda de colores. Modelo 4.1 (N/mm ²)	79
Ilustración 86: Vista frontal desde el lado exterior. Modelo 4.1	79
Ilustración 87: Vista frontal desde el lado interior. Modelo 4.1	79
Ilustración 88: Detalle del hueco superior desde el lado exterior. Modelo 4.1 ..	79
Ilustración 89: Detalle del hueco superior desde el lado interior. Modelo 4.1 ...	79
Ilustración 90: Dirección de las tensiones en el hueco superior del lado interior. Modelo 4.1.....	81
Ilustración 91: Dirección de las tensiones en el hueco del lado interior. Modelo 3.1	81
Ilustración 92: Esquema de esfuerzos de tensiones máximas J. Malmborg. A <i>Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 64.....	83
Ilustración 93: Esquema de esfuerzos de tensiones mayores a 50MPa. J. Malmborg. A <i>Finite Element Based Design Tool for Point Fixed Laminated Glass</i> . Master's thesis, Lund University of Technology, (2006). p. 64.....	84
Ilustración 94: Vista en perspectiva desde el lado exterior. Deformación ampliada un 20% del modelo 5.2	85
Ilustración 95: Vista en perspectiva desde el lado interior. Deformación ampliada un 20% del modelo 5.2	85
Ilustración 96: Vista frontal interior del modelo 5.2.....	86
Ilustración 97: Vista frontal exterior del modelo 5.2.....	86
Ilustración 98: Detalle del lado interior del hueco 1 del modelo 5.2.....	86
Ilustración 99: Detalle del lado exterior del hueco 1 del modelo 5.2.....	87
Ilustración 100: Detalle del lado exterior del hueco 1 del modelo 5.2.....	88
Ilustración 101: Detalle del lado interior del hueco 1 del modelo 5.2.....	88
Ilustración 102: Valores de las tensiones para el modelo 5.2	90
Ilustración 103: Comportamiento monolítico del espesor del panel de vidrio en el lado exterior. Modelo 5.2	90
Ilustración 104: Comportamiento monolítico del espesor del panel de vidrio en el lado interior. Modelo 5.2	90
Ilustración 105: Panel de 1x1m ² para los modelos 1.1; 1.2; 2.1 y 2.2	91

Ilustración 106: Panel de $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ para los modelos 2.9 y 2.10	91
Ilustración 107: Detalle de hueco del panel cuadrado	91
Ilustración 108: Mallado automático. Producción propia	93
Ilustración 109: Mallado manual alrededor del hueco con 11 circunferencias concéntricas y 32 segmentos radiales. Producción propia.....	93
Ilustración 110: Detalle de hueco mallado automático en panel de $1 \times 1 \text{ m}^2$	93
Ilustración 111: Detalle de hueco deformado con mallado manual en panel de $1 \times 1 \text{ m}^2$	94
Ilustración 112: Ver ilustración 17, página 22.....	95
Ilustración 113: Detalle del arco de descarga en el hueco del modelo 2.10....	96
Ilustración 114: Ilustración 115: Leyenda de colores. Modelo 2.10	96
Ilustración 116: Tensiones del modelo 2.10	98
Ilustración 117: Modelo 2.10	98

11.6. Tabla de gráficos:

Gráfico 1: Tensiones alrededor del hueco 1 en el lado interior. Modelos 3.1 ($0,8 \text{ N/mm}^2$) y 3.2 ($1,6 \text{ N/mm}^2$)	77
Gráfico 2: Tensiones alrededor del hueco 1 en el lado exterior. Modelos 3.1 ($0,8 \text{ N/mm}^2$) y 3.2 ($1,6 \text{ N/mm}^2$)	77
Gráfico 3: Tensiones alrededor del hueco superior en el lado interior. Modelos 4.1 y 4.2 (N/mm^2)	80
Gráfico 4: Tensiones alrededor del hueco superior en el lado exterior. Modelos 4.1 y 4.2 (N/mm^2)	80
Gráfico 5: Comparación entre la distribución de tensiones en el contorno del hueco 1 en el lado interior	86
Gráfico 6: Comparación entre la distribución de tensiones en el contorno del hueco 1 en el lado exterior	87
Gráfico 7: Comparación entre las tensiones en ambos lados	88
Gráfico 8: Comparación entre las tensiones en ambos lados	89
Gráfico 9: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco	93
Gráfico 10: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco	94
Gráfico 11: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco para todas las dimensiones de paneles con una carga de 21 N/mm^2	95
Gráfico 12: Tensiones de compresión y tracción alrededor del hueco para todas las dimensiones de paneles con una carga de 40 N/mm^2	96
Gráfico 13: Incremento de las tensiones máximas y mínimas en el contorno del hueco entre paneles de distinta dimensión	97

11.7. Tablas:

Tabla 1: Composición del vidrio	12
Tabla 2: Principales propiedades física	12
Tabla 3: Valores característicos de la resistencia del vidrio a flexión del lado de las tracciones	13
Tabla 4: Tipos de corte	14
Tabla 5: Resistencias del mortero híbrido y resina epoxi como junta elástica.	34
Tabla 6: Propiedades del Nylon para su uso como junta elástica.	35
Tabla 7: Relación entre el límite del diámetro de los taladros y la máxima tolerancia.....	35
Tabla 8: Tolerancias en el alineamiento del vidrio laminado	35
Tabla 9: Tabla resumen de los valores máximos y mínimos de las tensiones en los huecos de las barandillas de 2 y 4 pernos, para una carga lineal de 1,6N/mm en el borde superior	81
Tabla 10: Cociente entre las tensiones de la barandilla de 2 pernos y la de 4.	82
Tabla 11: Simulación de paneles cuadrados de espesor 8+8mm con hueco central de 36mm de diámetro.....	92
Tabla 12: Tensiones máximas (T) y mínimas (C).....	93
Tabla 13: Índices de crecimiento (adimensional). Producción propia.....	98
Tabla 14: Valores de las tensiones de los modelos 1.1 y 1.2.....	1
Tabla 15: Valores de las tensiones de los modelos 2.1 - 2.10	2
Tabla 16: Valores de las tensiones de los modelos 3.1 y 3.2.....	3
Tabla 17: Valores de las tensiones de los modelos 4.1 y 4.2 para los pernos superior interior, superior exterior, inferior interior e inferior exterior.	4
Tabla 18: Valores de las tensiones de los modelos 5.1, 5.2 y 5.3.....	5

12. GLOSARIO DE TÉRMINOS

“Beam”: element lineal. Consta de dos nodos extremos unidos por el element.

“Brick”: Se emplea en mallados tridimensionales. En función de su forma puede constar como mínimo de 4 nodos (tetraedro), 5 nodos (pirámides), 6 nodos (cuñas) u 8 nodos (hexaedros).

FEM: Finite Element Method ó método de elementos finitos; así es como se designa la categoría de programas informáticos que realizan cálculos estructurales mediante el uso de elementos finitos.

Índice λ : también se conoce como índice a/b, y se entiende como el cociente entre el diámetro del hueco y la longitud de uno de los lados. También puede calcularse a partir del radio y la distancia entre el centro del hueco y el lado más próximo, cuando el hueco no está centrado, como ocurre en paneles para fachadas y barandillas.

K, α : Coeficiente de concentración de tensiones (Stress Concentration Factor, SCF). Es la relación entre la tensión que se produce en un mismo punto, cuando hay un hueco en el panel y cuando no hay perforación. Por tanto es un valor que indica el número de veces que aumenta la tensión en un punto cualquiera del panel ante la presencia de una abertura en el mismo.

Nodo: Es la unidad básica que conforma el mallado de cualquier figura. Es importante no confundirlo con los vértices, puesto que un vértice consiste en un punto geométrico, mientras que un nodo guarda información acerca de las propiedades, del material a simular y/o las restricciones y cargas establecidas.

Ovalización: Se trata del tipo de deformación que tiende a adquirir un hueco circular en un panel al someter a este a esfuerzos de tracción.

Perno cilíndrico: Consiste en un pasador cilíndrico que conecta dos discos dispuestos a ambos lados del panel. En función de la posición la transmisión se realiza hacia el pasador (panel vertical) o a los discos (panel horizontal).

Perno avellanado: Es un tipo de anclaje con forma troncocónica, para evitar que salga del alojamiento. Es más estético que el cilíndrico por quedar al ras del panel y tener menores dimensiones.

“Plate”: Se llama así a los elementos bidimensionales que forman el mallado de elementos en los que predomina dos de sus dimensiones frente a la tercera.

σ_{\max} : Tensión máxima. Se refiere a la máxima tensión que se da en el campo de las tracciones

σ_{\min} : Tensión mínima. Se refiere a la máxima tensión en valor absoluto que se da en el campo de las compresiones.

ANEXOS

Anexo I (páginas 1-19):

Catálogo de imágenes de las simulaciones desarrolladas en el apartado 7

Anexo II (páginas 1-5):

Banco de datos que contiene las tablas con los valores de las tensiones empleadas en todas las gráficas utilizadas en el apartado 7

ANEXO I

Modelo 1.1

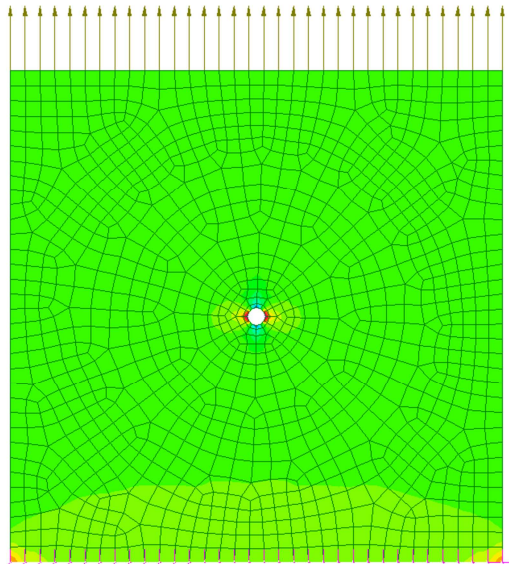


Ilustración 120: Panel cuadrado de 1m de lado. Carga 21N/mm². Mallado automático. Modelo 1.1

Modelo 1.2

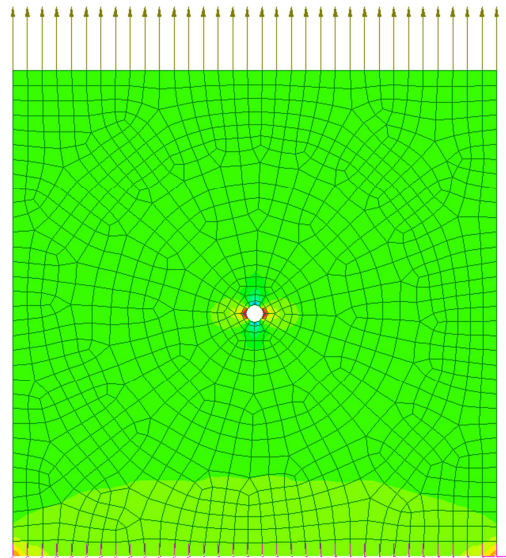


Ilustración 118: Panel cuadrado de 1m de lado. Carga 40N/mm². Mallado automático. Modelo 1.2

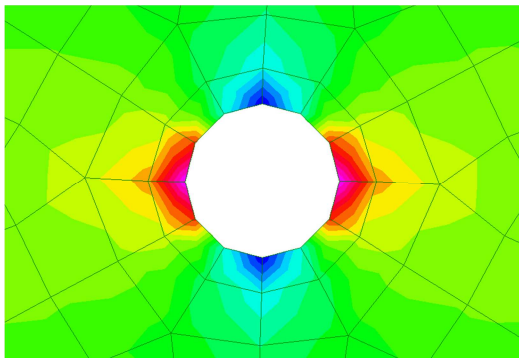


Ilustración 119: Detalle del hueco del modelo 1.1

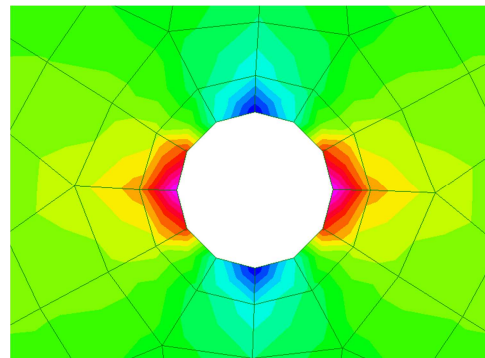


Ilustración 122: Detalle del hueco del modelo 1.2

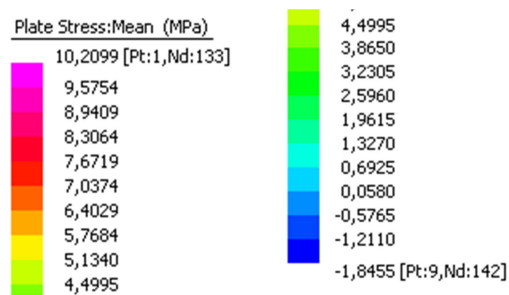


Ilustración 121: Leyenda de colores. Modelo 1.1

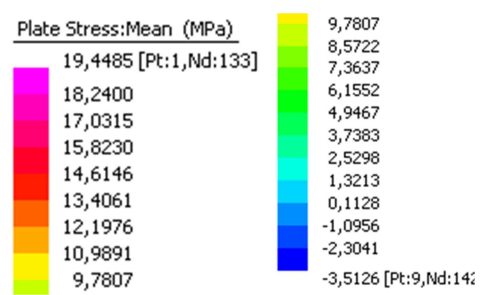


Ilustración 123: Leyenda de colores. Modelo 1.2

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Modelo 2.1

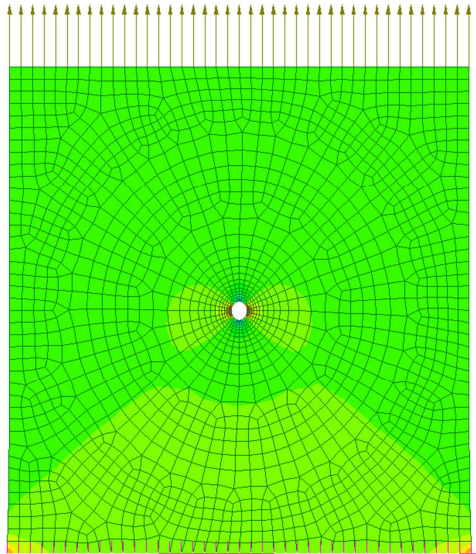


Ilustración 124: Panel cuadrado de 1m de lado. Carga 21N/mm². Mallado manual. Modelo 2.1

Modelo 2.2

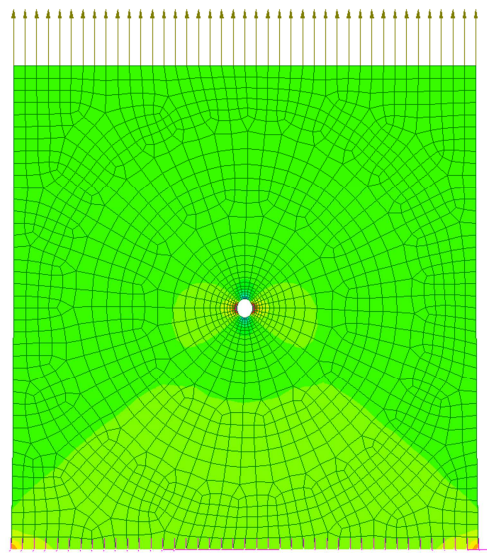


Ilustración 127: Panel cuadrado de 1m de lado. Carga 40N/mm². Mallado manual. Modelo 2.2

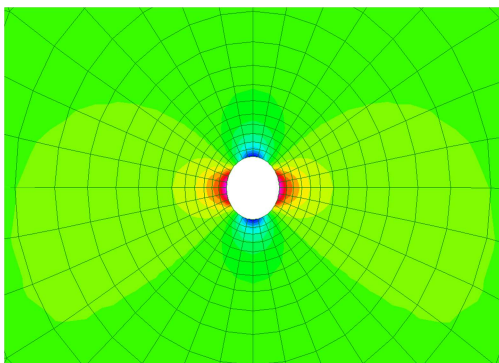


Ilustración 125: Detalle del hueco del modelo 2.1

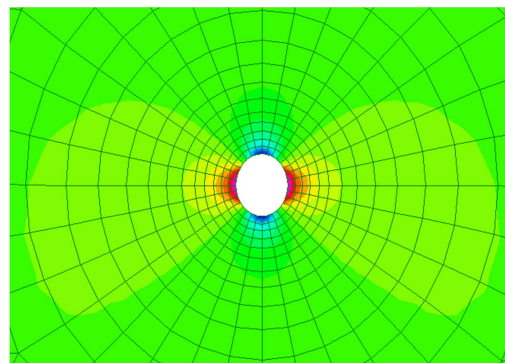


Ilustración 128: Detalle del hueco del modelo 2.2

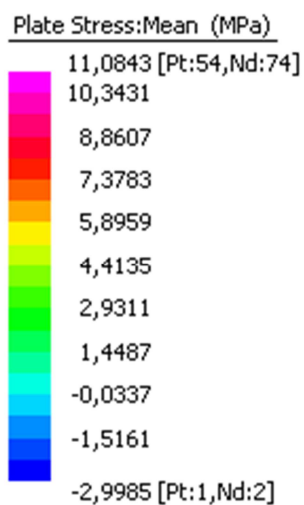


Ilustración 126: Leyenda de colores. Modelo 2.1

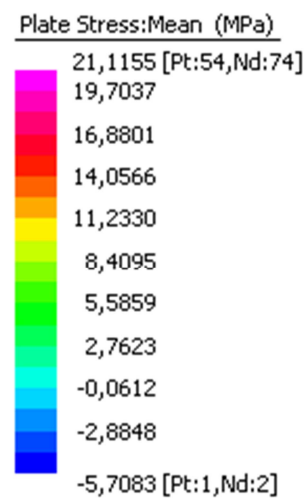


Ilustración 129: Leyenda de colores. Modelo 2.1

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Modelo 2.3

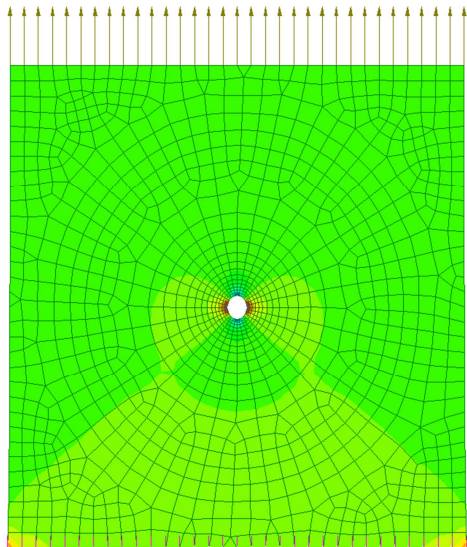


Ilustración 130: Panel cuadrado de 0,8m de lado. Carga 21N/mm². Mallado manual. Modelo 2.3

Modelo 2.4

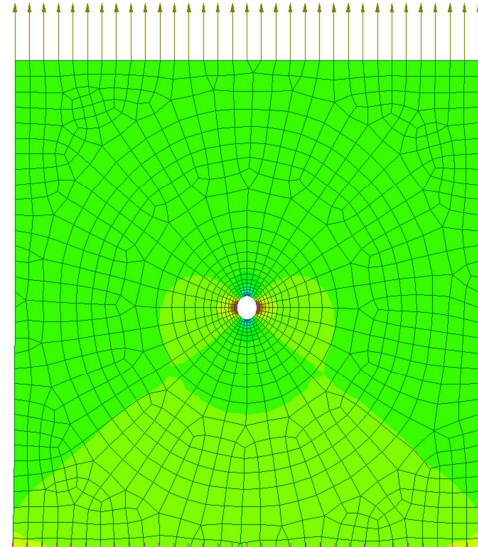


Ilustración 133: Panel cuadrado de 0,8m de lado. Carga 40N/mm². Mallado manual. Modelo 2.4

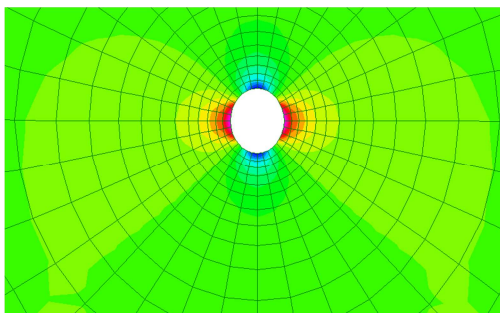


Ilustración 131: Detalle del hueco del modelo 2.3

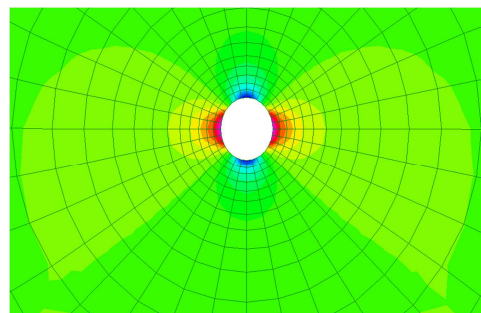


Ilustración 134: Detalle del hueco del modelo 2.4

Plate Stress:Mean (MPa)

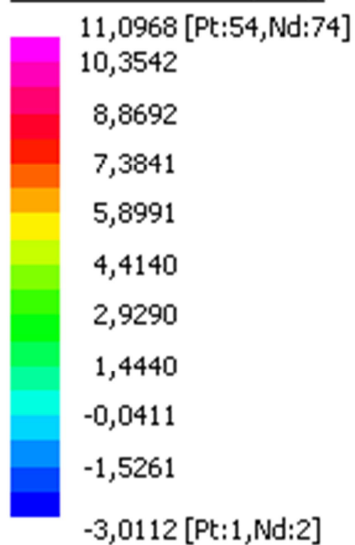


Ilustración 132: Leyenda de colores. Modelo

Plate Stress:Mean (MPa)

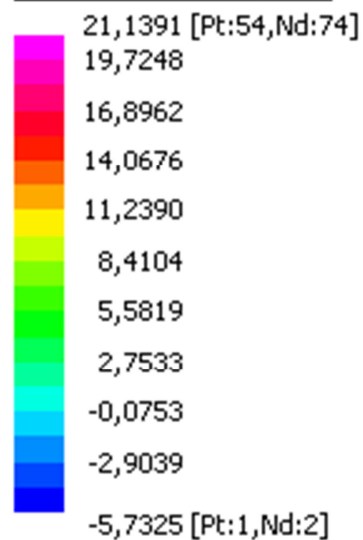


Ilustración 135: Leyenda de colores. Modelo 2.4

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Modelo 2.5

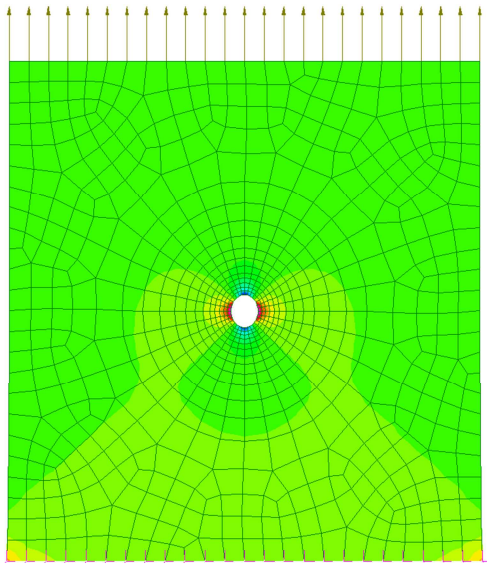


Ilustración 136: Panel cuadrado de 0,6m de lado. Carga 21N/mm². Mallado manual. Modelo 2.5

Modelo 2.6

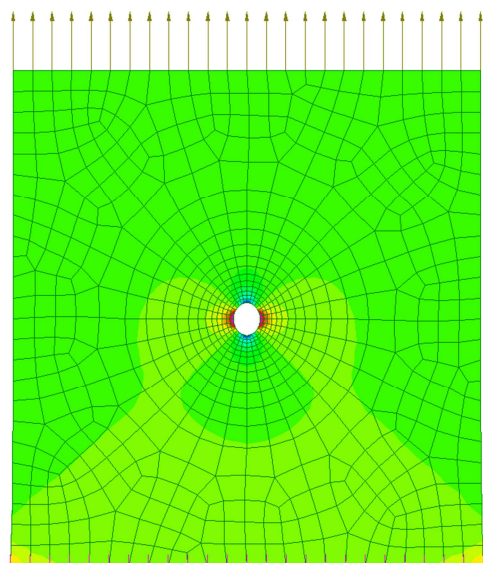


Ilustración 139: Panel cuadrado de 0,6m de lado. Carga 40N/mm². Mallado manual. Modelo 2.6

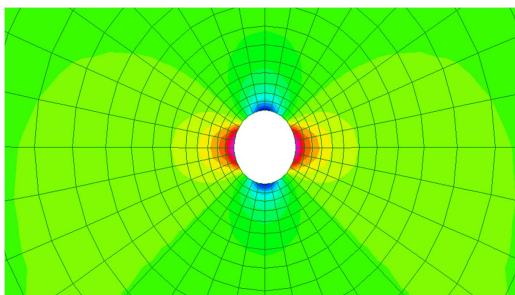


Ilustración 137: Detalle del hueco del modelo 2.5

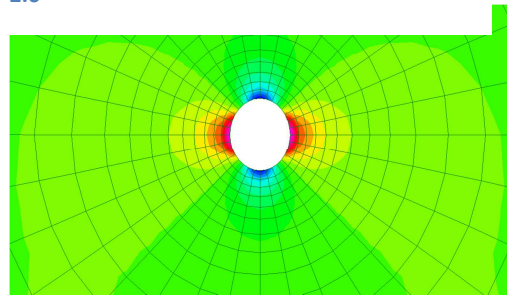


Ilustración 140: Detalle del hueco del modelo 2.6

Plate Stress:Mean (MPa)

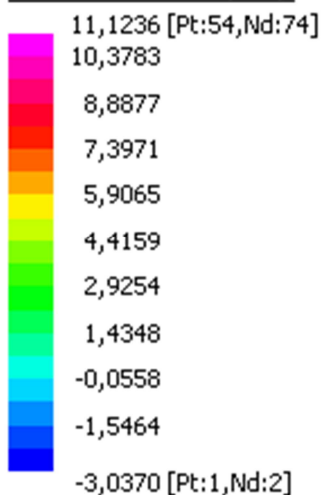


Ilustración 138: Leyenda de colores. Modelo 2.5

Plate Stress:Mean (MPa)

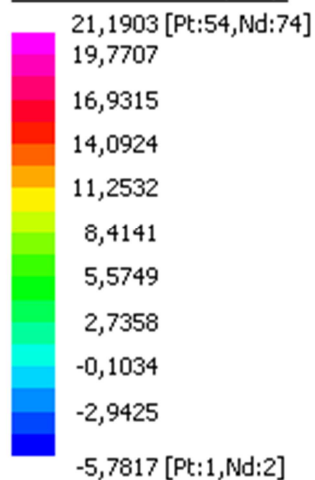


Ilustración 141: Leyenda de colores. Modelo 2.6

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Modelo 2.7

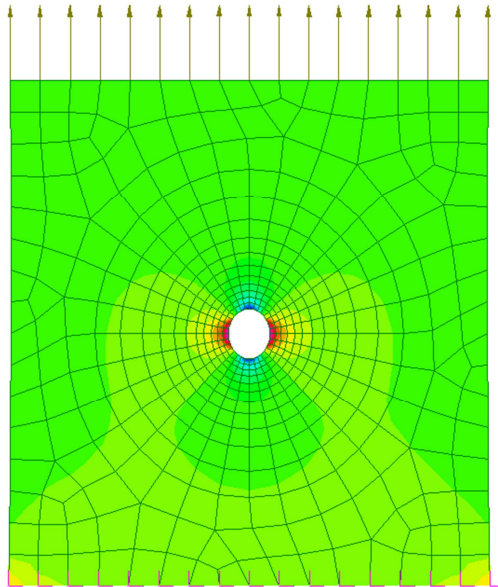


Ilustración 142: Panel cuadrado de 0,4m de lado. Carga 21N/mm². Mallado manual. Modelo 2.7

Modelo 2.8

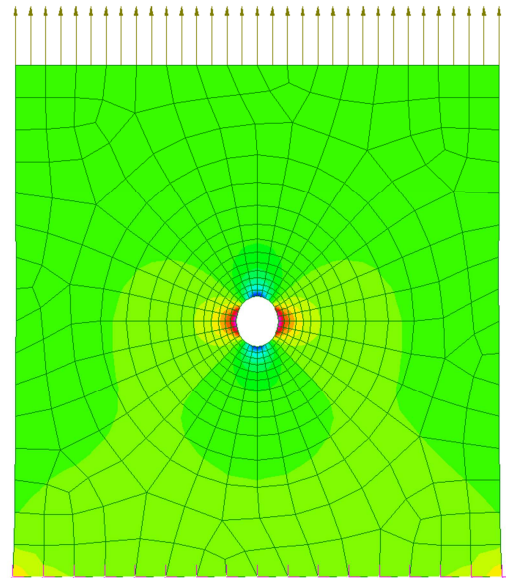


Ilustración 145: Panel cuadrado de 0,4m de lado. Carga 40N/mm². Mallado manual. Modelo 2.8

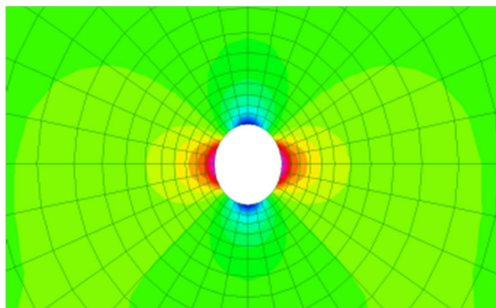


Ilustración 143: Detalle del hueco del modelo 2.7

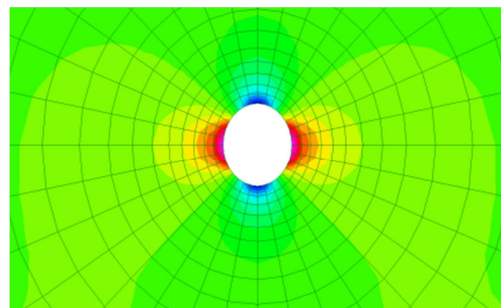


Ilustración 146: Detalle del hueco del modelo 2.8

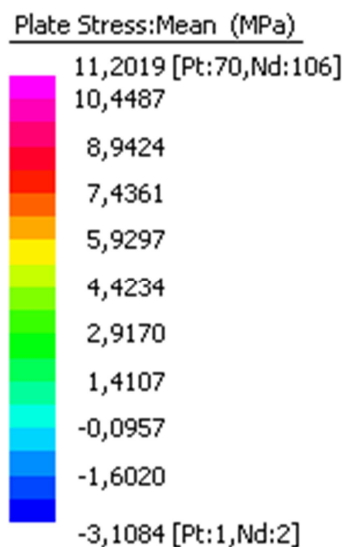


Ilustración 144: Leyenda de colores. Modelo 2.7

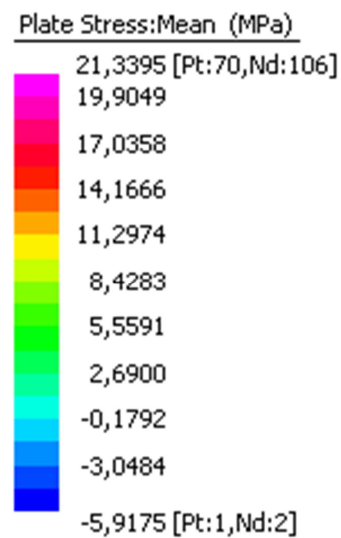


Ilustración 147: Leyenda de colores. Modelo 2.8

Modelo 2.9

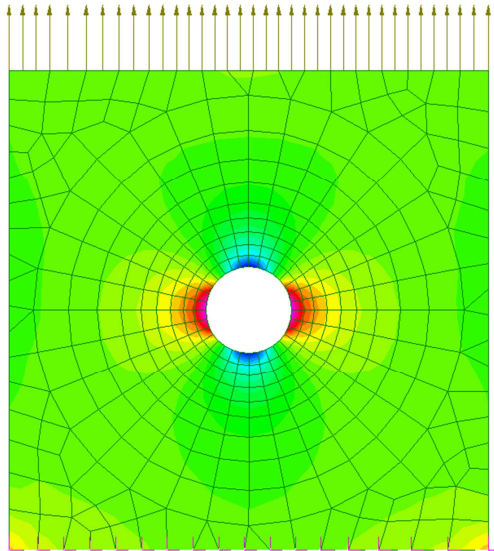


Ilustración 148: Panel cuadrado de 0,2m de lado. Carga 21N/mm². Mallado manual. Modelo 2.9

Modelos 2.10

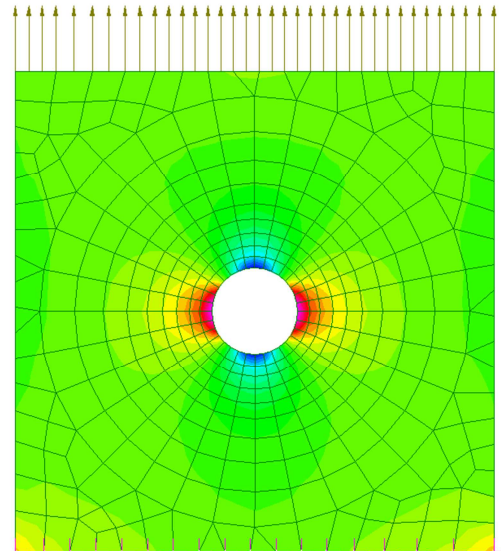


Ilustración 151: Panel cuadrado de 0,2m de lado. Carga 40N/mm². Mallado manual. Modelo 2.10

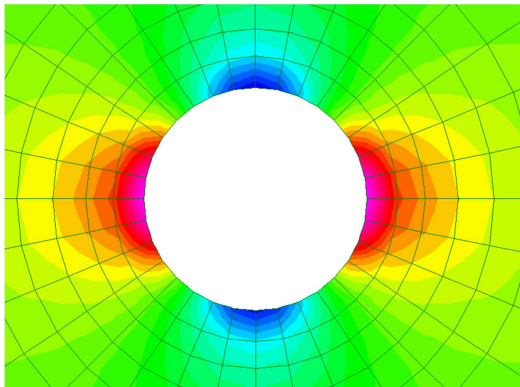


Ilustración 149: Detalle del hueco del modelo 2.9

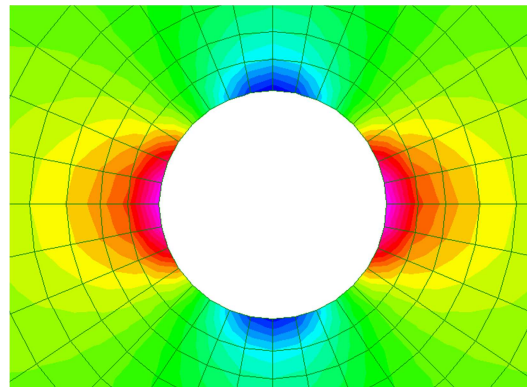


Ilustración 152: Detalle del hueco del modelo 2.10

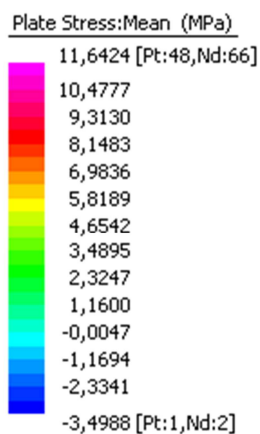


Ilustración 150: Leyenda de colores. Modelo 2.9

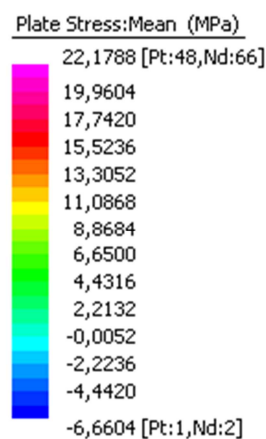


Ilustración 153: Leyenda de colores. Modelo 2.10

Perno:

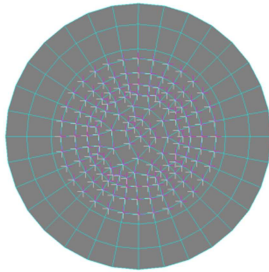


Ilustración 156:
Alzado del perno

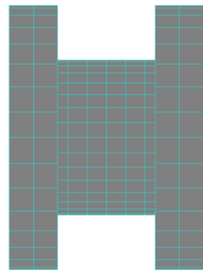


Ilustración 154: Perfil del
perno

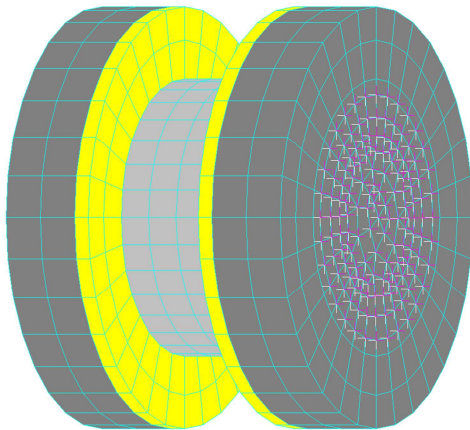


Ilustración 155: Vista en perspectiva del perno con
las juntas de mortero (gris claro) y nylon (amarillo)

Módulo:

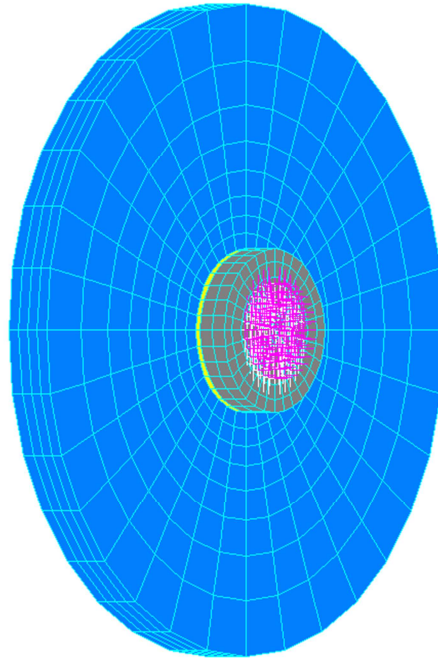


Ilustración 157: Vista en perspectiva del mallado
manual del panel de vidrio y el perno

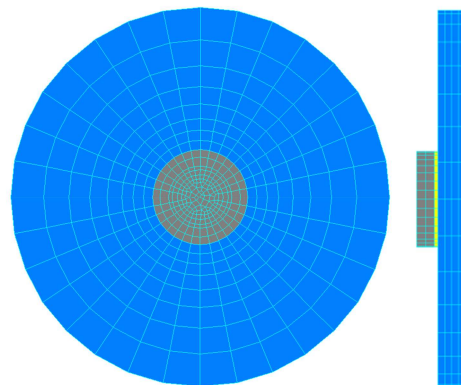


Ilustración 158: Alzado y perfil del mallado
manual del panel de vidrio con el perno

Barandilla de dos pernos: Modelos 3.1 y 3.2

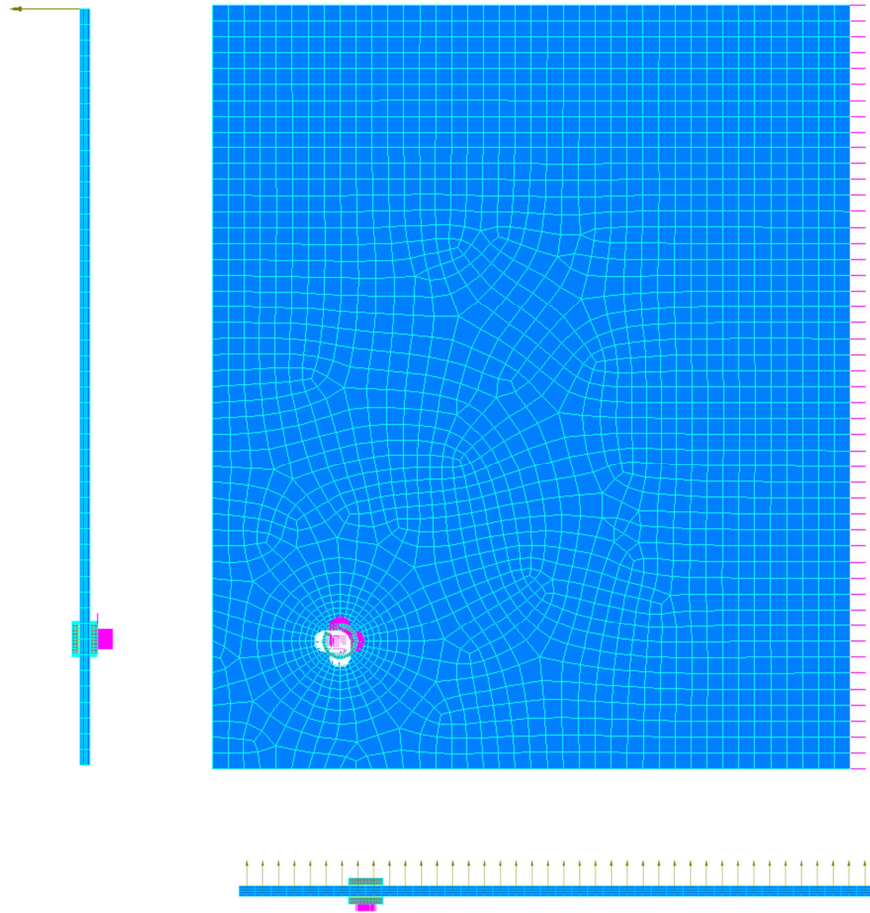


Ilustración 159: Planta, alzado y perfil de media barandilla de dos pernos. El lateral derecho representa el eje de simetría. Modelos 3.1 y 3.2

Modelo 3.1

Lado interior:

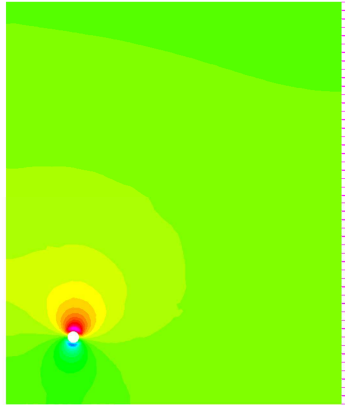


Ilustración 160: Vista frontal del lado interior del panel. Carga de 21N/mm². Modelo 3.1

Lado exterior:

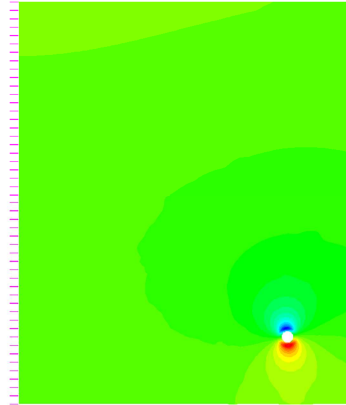


Ilustración 163: Vista frontal del lado exterior del panel. Carga de 21N/mm². Modelo 3.1

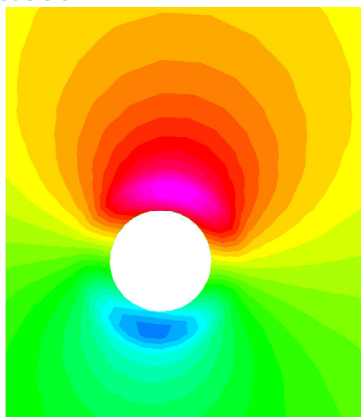


Ilustración 161: Detalle del hueco del lado interior. Modelo 3.1

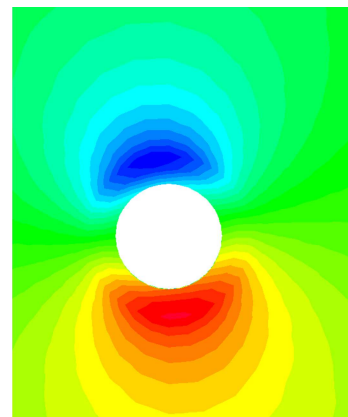


Ilustración 164: Detalle del hueco del lado exterior. Modelo 3.1

Tensiones de tracción y compr.

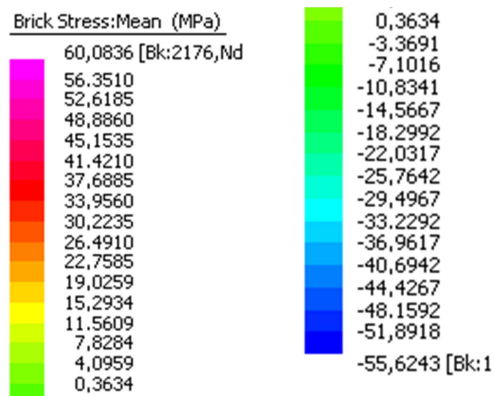


Ilustración 162: Legenda de colores. Modelo 3.1

Deformación vista de perfil



Ilustración 165: Deformación del panel de dos pernos visto en perfil. Modelo 3.1

Modelo 3.2

Lado interior

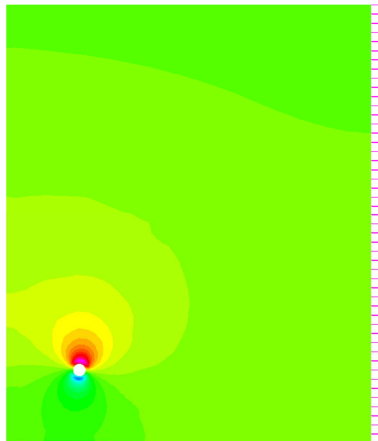


Ilustración 166: Vista frontal del lado interior del panel. Carga de 40N/mm^2 . Modelo 3.2

Lado exterior

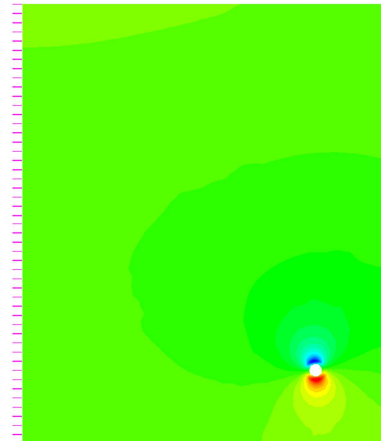


Ilustración 169: Vista frontal del lado exterior del panel. Carga de 40N/mm^2 . Modelo 3.2

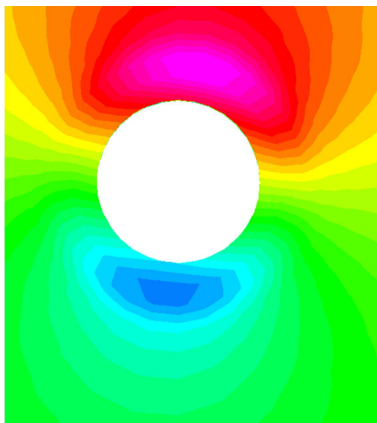


Ilustración 167: Detalle del hueco del lado interior. Modelo 3.2

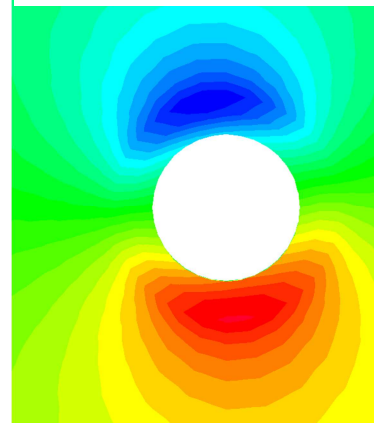


Ilustración 170: Detalle del hueco del lado exterior. Modelo 3.2

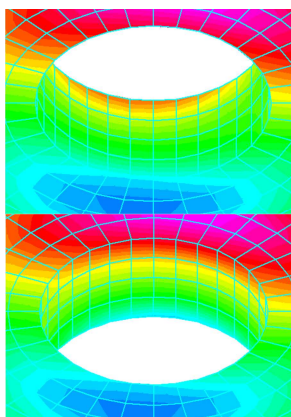


Ilustración 168: Canto del hueco desde el lado interior. Modelo 3.2

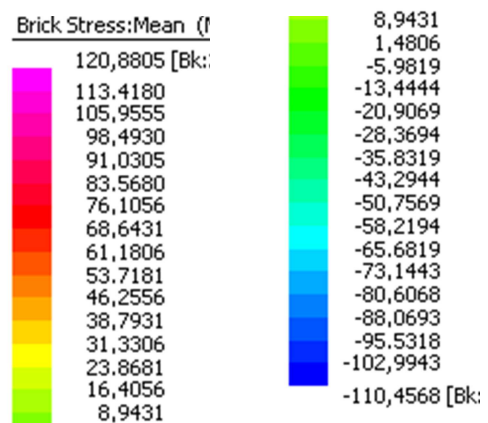


Ilustración 171: Leyenda de colores. Modelo 3.2

Barandilla de 4 pernos: Modelos 4.1 y 4.2

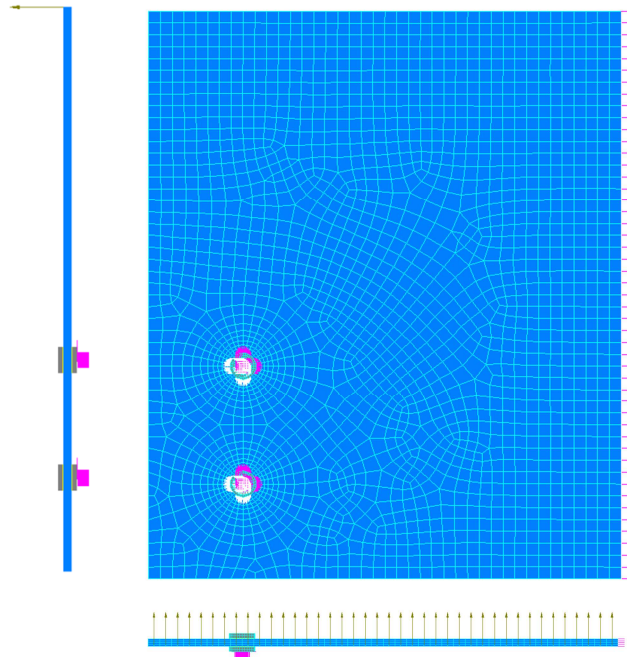


Ilustración 172: Planta, alzado y perfil de media barandilla de 4 pernos. El lateral derecho representa el eje de simetría. Modelos 4.1 y 4.2

Modelo 4.1

Lado interior

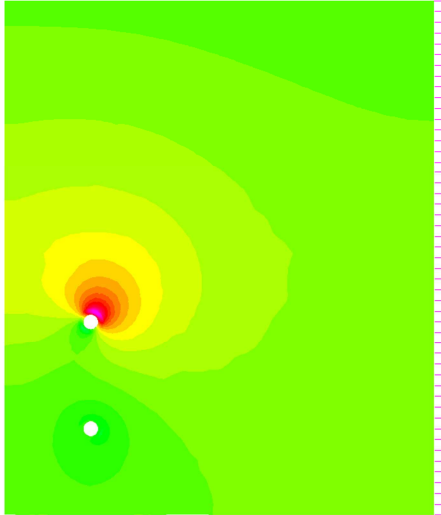


Ilustración 173: Vista frontal del lado interior del panel. Carga de 21N/mm^2 . Modelo 4.1

Lado exterior

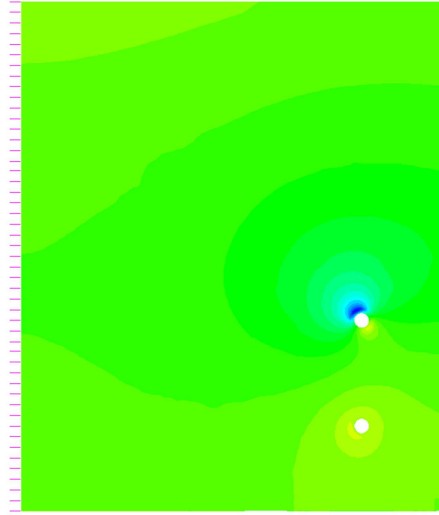


Ilustración 176: Vista frontal del lado exterior del panel. Carga de 21N/mm^2 . Modelo 4.1

Detalle de hueco superior:



Ilustración 174: Detalle del hueco superior del lado interior. Modelo 4.1

Detalle de hueco superior:

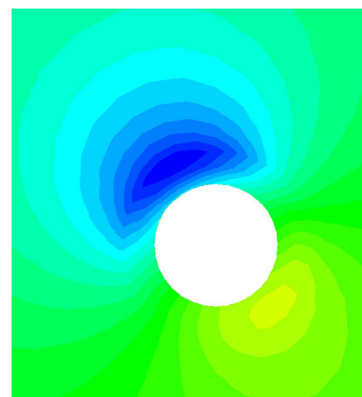


Ilustración 177: Detalle del hueco superior del lado exterior. Modelo 4.1

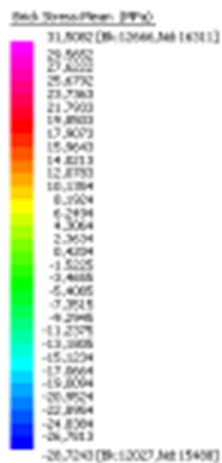


Ilustración 175: Leyenda de colores. Modelo 4.1

Modelo 4.2

Lado interior

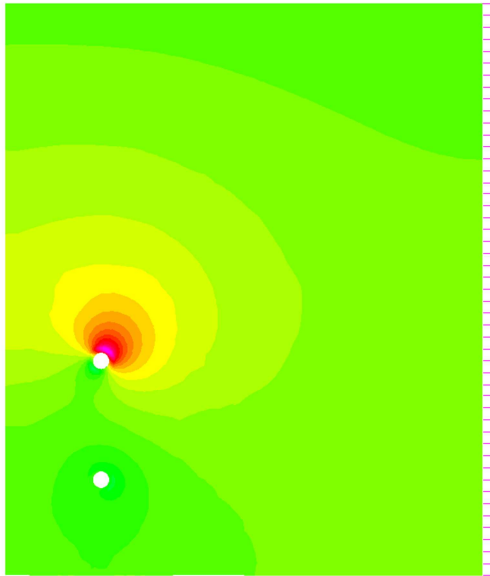


Ilustración 178: Vista frontal del lado interior del panel. Carga de 40N/mm^2 . Modelo 4.2

Lado exterior

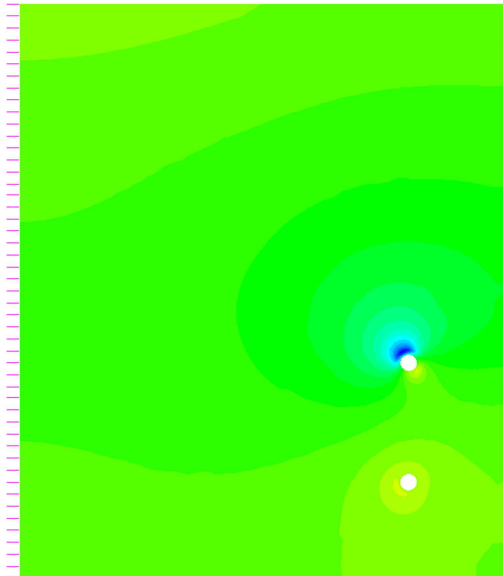


Ilustración 181: Vista frontal del lado exterior del panel. Carga de 40N/mm^2 . Modelo 4.2

Detalle de hueco superior

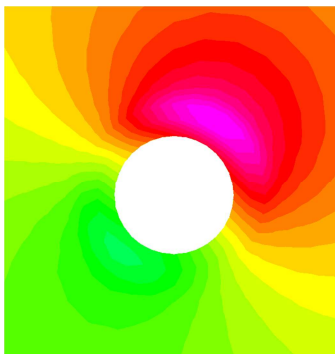


Ilustración 179: Detalle del hueco superior del lado interior. Modelo 4.2

Detalle de hueco superior

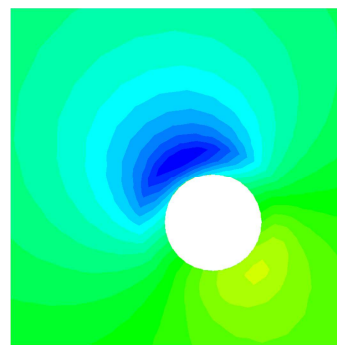


Ilustración 182: Detalle del hueco superior del lado exterior. Modelo 4.2

Tensiones de tracción y comp.

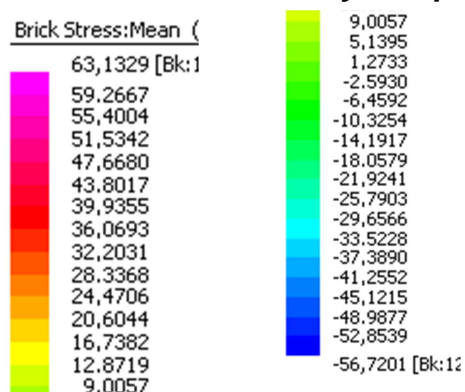


Ilustración 180: Leyenda de colores. Modelo 4.2

Modelo 5:

Panel de $1400 \times 1400 \text{ mm}^2$ con cuatro pernos, uno en cada a esquina, con restricción de desplazamiento y giro en los 3 ejes. Están sometidos a una carga de viento de 1000 N/m^2 , para lo cual se ha aplicado una carga perpendicular al panel de presión con la opción global pressure, que garantiza que las cargas se apliquen siempre en la dirección del eje, es decir sin variar la dirección para mantener la perpendicularidad cuando el panel se deforma.

Como el modelo es simétrico en los ejes vertical y horizontal, los detalles de los huecos corresponden siempre al hueco inferior derecho visto desde el exterior o izquierdo del lado interior y se denominará hueco 1.

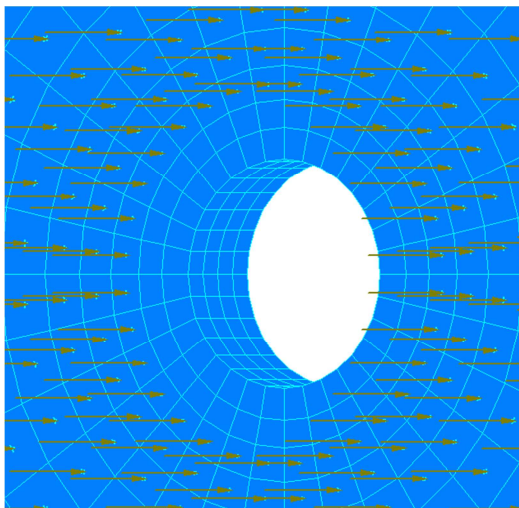


Ilustración 183: Detalle de la carga de viento cerca del hueco

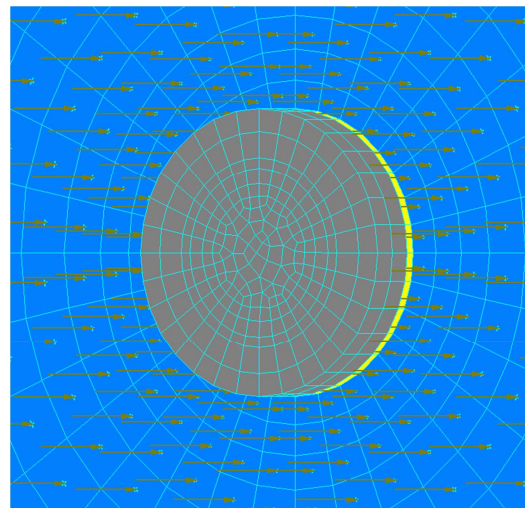


Ilustración 184: Detalle de la carga de viento alrededor del perno.

Se desprecia la influencia de la superficie del perno al aplicar la carga de viento

Modelo 5.1

Vista Frontal exterior

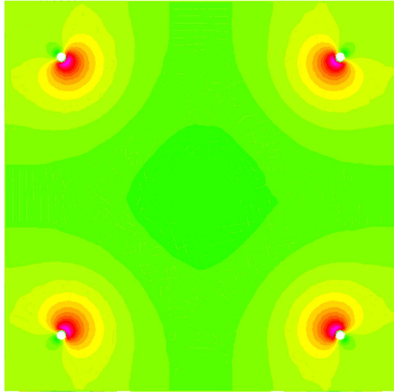


Ilustración 185: Vista frontal del lado exterior del panel. Modelo 5.1

Vista frontal interior

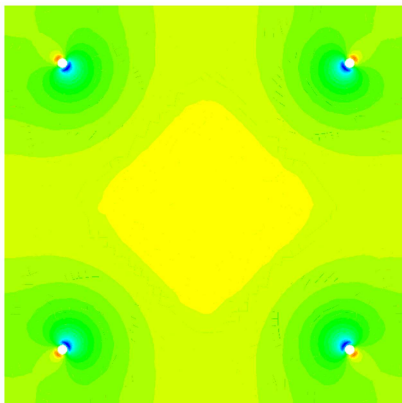


Ilustración 186: Vista frontal del lado interior del panel. Modelo 5.1

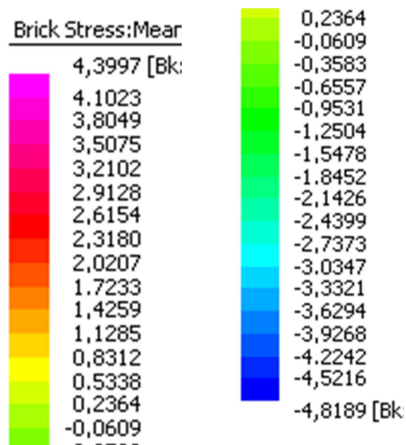


Ilustración 187: Leyenda de colores. Modelo 5.1

Modelo 5.2

Vista frontal exterior

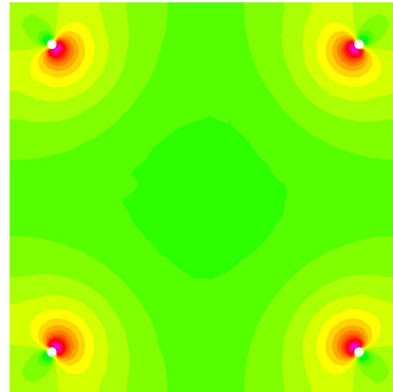


Ilustración 188: Vista frontal del lado exterior del panel. Modelo 5.2

Vista interior

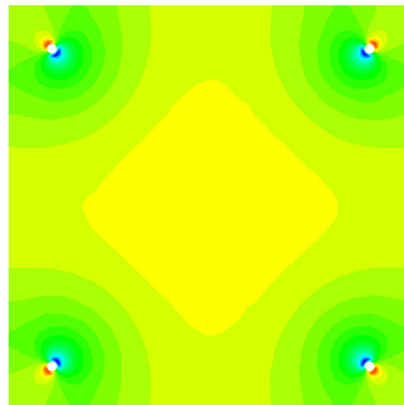


Ilustración 189: Vista frontal del lado interior del panel. Modelo 5.2

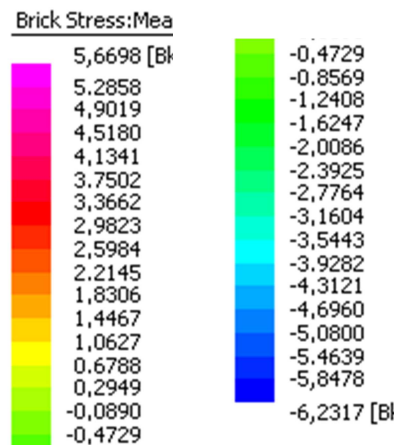


Ilustración 190: Leyenda de colores. Modelo 5.2

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Vista en perspectiva desde el lado exterior.

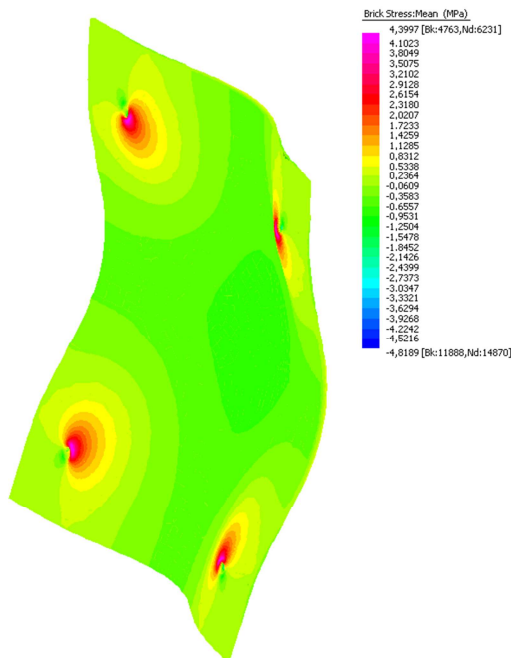


Ilustración 191: Vista en perspectiva desde el lado exterior. Imagen deformada un 20%. Modelo 5.1

Vista en perspectiva desde el lado exterior.

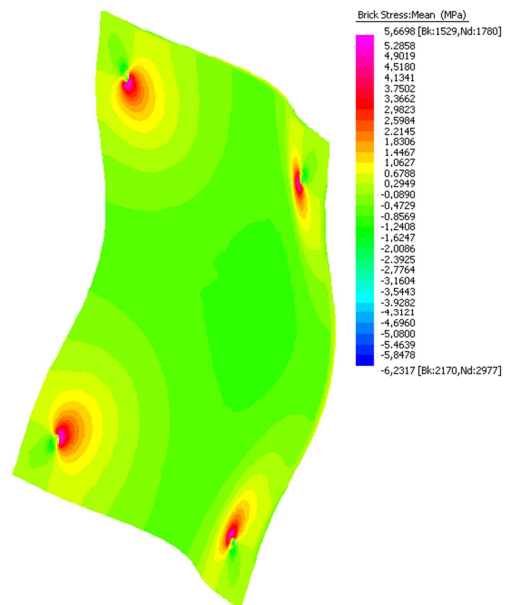


Ilustración 193: Vista en perspectiva desde el lado exterior. Imagen deformada un 20%. Modelo 5.2

Vista en perspectiva desde el lado interior.

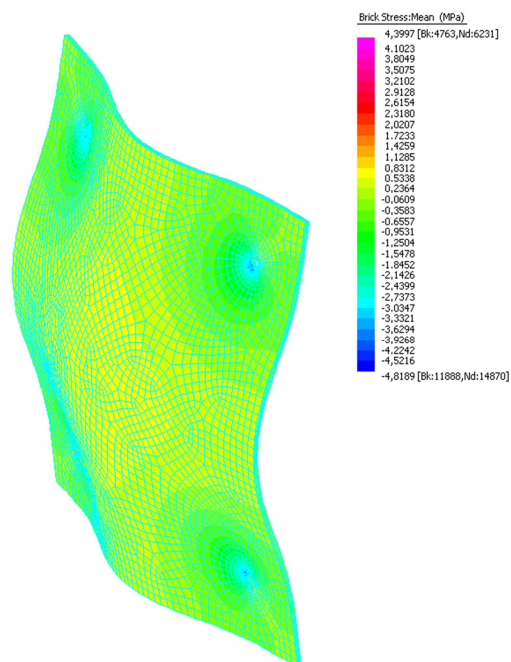


Ilustración 192: Vista en perspectiva desde el lado interior. Imagen deformada un 20%. Modelo 5.1

Vista en perspectiva desde el lado interior.

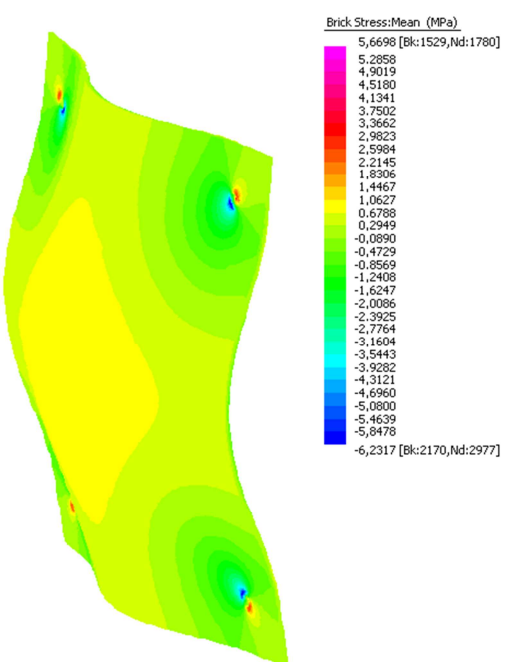


Ilustración 194: Vista en perspectiva desde el lado interior. Imagen deformada un 20%. Modelo 5.2

Detalle de hueco 1, lado interior

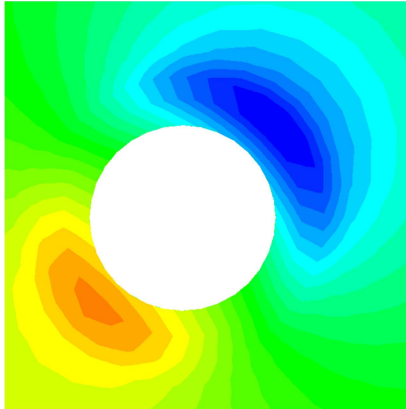


Ilustración 195: Detalle hueco 1 del lado interior. Modelo 5.1

Vista del canto inferior del hueco desde el lado interior

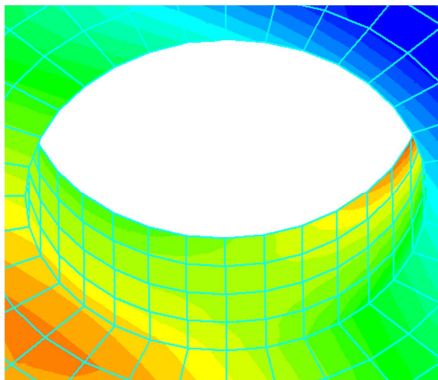


Ilustración 196: Vista del canto inferior del hueco 1 desde el lado interior. Modelo 5.1

Vista del canto superior del hueco desde el lado interior

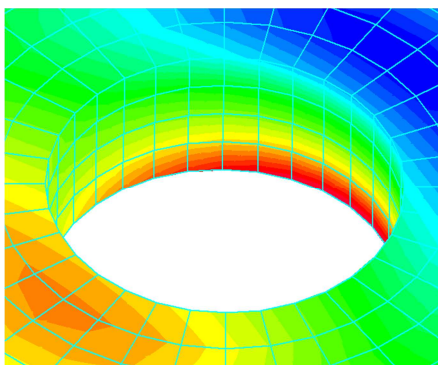


Ilustración 197: Vista del canto superior del hueco 1 desde el lado interior. Modelo 5.1

Detalle de hueco 1, lado interior

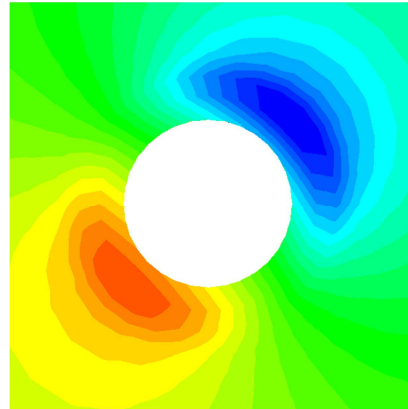


Ilustración 198: Detalle hueco 1 del lado interior. Modelo 5.2

Vista del canto inferior del hueco desde el lado interior

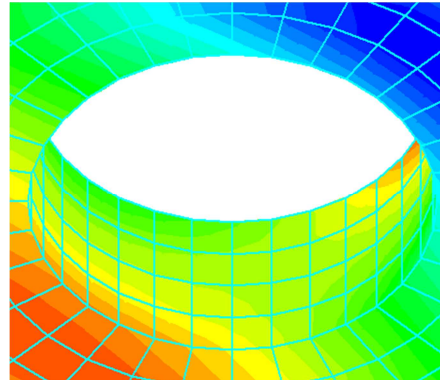


Ilustración 199: Vista del canto inferior del hueco 1 desde el lado interior. Modelo 5.2

Vista del canto superior del hueco desde el lado interior

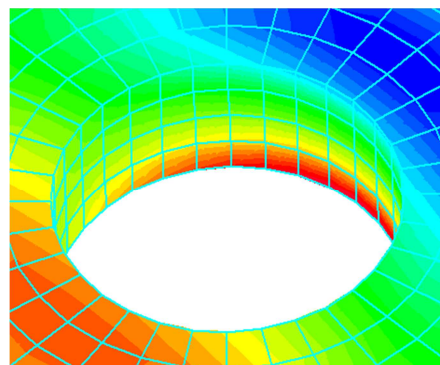


Ilustración 200: Vista del canto superior del hueco 1 desde el lado interior. Modelo 5.2

Detalle de hueco 1, lado exterior

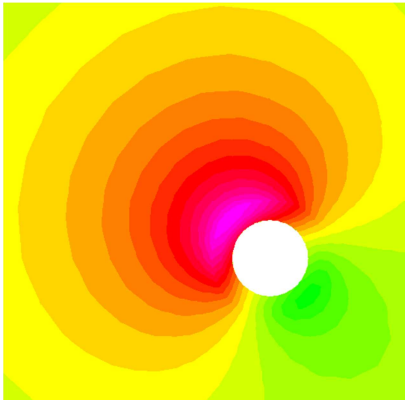


Ilustración 201: Detalle de hueco 1, lado exterior. Modelo 5.1

Detalle de hueco 1, lado exterior

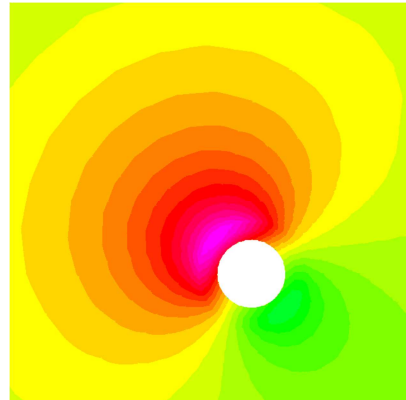


Ilustración 204: Detalle de hueco 1, lado exterior. Modelo 5.2

Vista del canto inferior del hueco desde el lado exterior

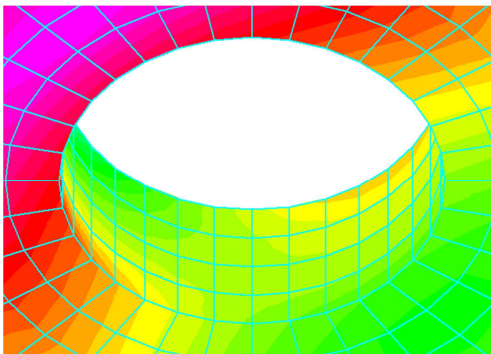


Ilustración 202: Vista del canto inferior del hueco 1 desde el lado exterior. Modelo 5.1

Vista del canto inferior del hueco desde el lado exterior

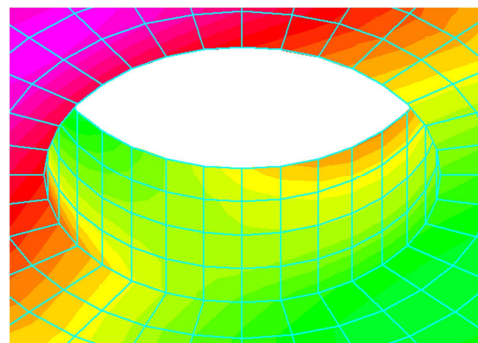


Ilustración 205: Vista del canto inferior del hueco 1 desde el lado exterior. Modelo 5.2

Vista del canto superior del hueco desde el lado exterior

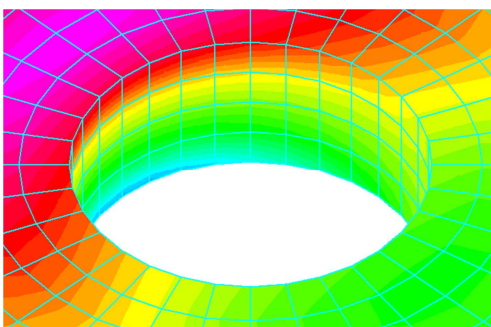


Ilustración 203: Vista del canto superior del hueco 1 desde el lado exterior. Modelo 5.1

Vista del canto superior del hueco desde el lado exterior

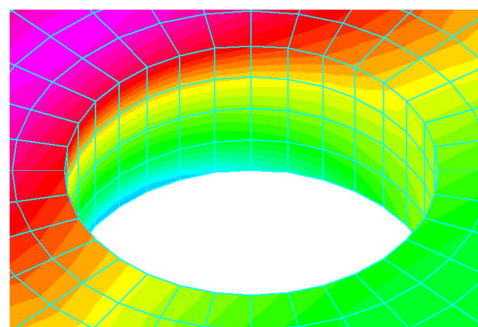


Ilustración 206: Vista del canto superior del hueco 1 desde el lado exterior. Modelo 5.2

Modelo 5.3

Vista frontal exterior

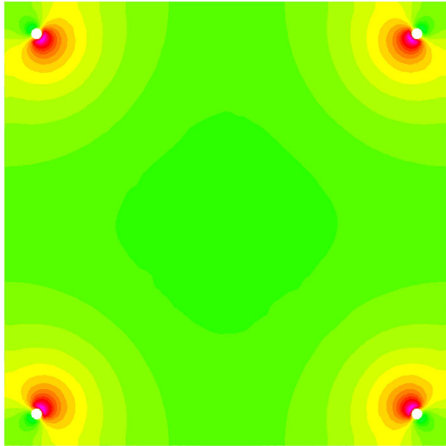


Ilustración 207: Vista frontal del lado exterior del panel. Modelo 5.3

Detalle de hueco 1, lado exterior

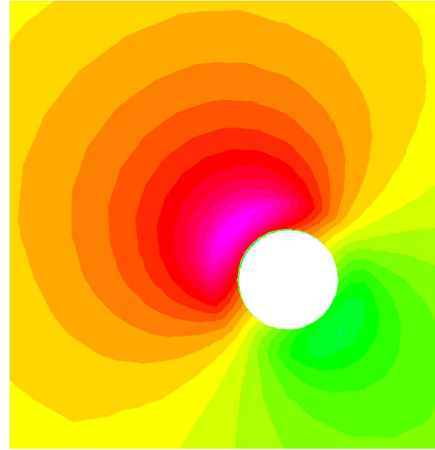


Ilustración 210: Detalle de hueco 1, lado exterior. Modelo 5.3

Vista frontal interior

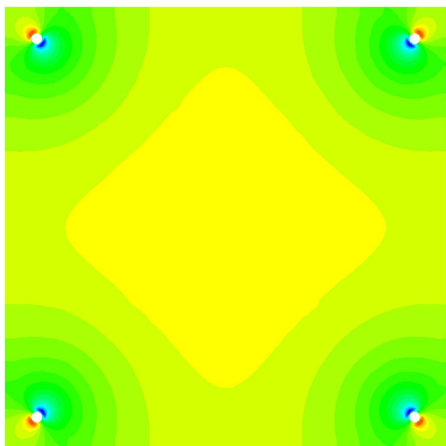


Ilustración 208: Vista frontal del lado interior del panel. Modelo 5.3

Detalle de hueco 1, lado interior

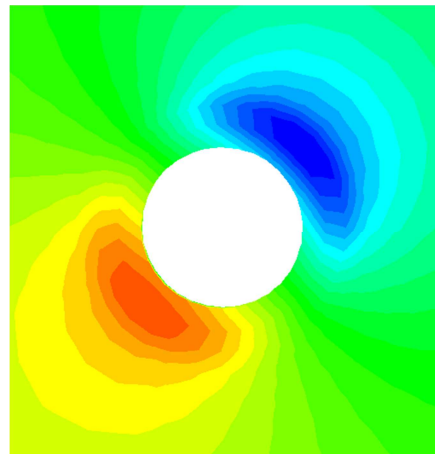


Ilustración 211: Detalle de hueco 1, lado interior. Modelo 5.3

Tensiones de tracción y compresión

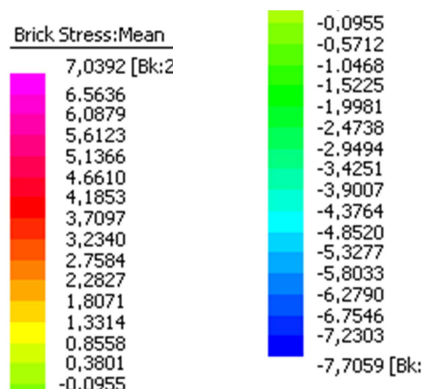


Ilustración 209: Leyenda de colores. Modelo 5.3

ANEXO II

- **Modelos 1 y 2:** Paneles cuadrados de entre 1000mm y 200mm de lado, con un hueco central de 36mm de diámetro. El lado inferior tiene restringido desplazamiento y giro en los tres ejes. Sobre el lado superior se aplica una carga lineal uniforme de tracción en sentido vertical y ascendente de 21 N/mm² en los modelos 1.1, 2.1, 2.3, 2.5, 2.7 y 2.9 y 40N/mm² en los modelos 1.2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 y 2.10.

Numeración	Grados	Tensión (N/mm2)	
		1.1	1.2
1	0	-3,6879	-7,01425
2	30	2,40735	4,59805
3	60	14,47695	27,5846
4	90	10,20535	19,4408
5	120	14,43655	27,50785
6	150	2,38525	4,55605
7	180	-3,64055	-6,92405
8	210	2,43565	4,65195
9	240	14,4843	27,59865
10	270	20,41815	38,89575
11	300	14,4276	27,4908
12	330	2,3537	4,4959

Tabla 14: Valores de las tensiones de los modelos 1.1 y 1.2

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

Num.	Grados	Tensión (N/mm2)									
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
1	0	-5,99	-11,40	-6,02	-11,45	-6,07	-11,55	-6,21	-11,82	-6,99	-13,30
2		-4,92	-9,36	-4,94	-9,40	-4,99	-9,49	-5,12	-9,74	-5,82	-11,07
3		-1,86	-3,54	-1,88	-3,57	-1,92	-3,64	-2,01	-3,81	-2,47	-4,70
4		2,71	5,17	2,70	5,16	2,69	5,13	2,65	5,06	2,52	4,81
5	45	8,10	15,44	8,10	15,45	8,11	15,46	8,14	15,52	8,38	15,98
6		13,49	25,70	13,50	25,73	13,53	25,78	13,62	25,96	14,20	27,06
7		18,06	34,40	18,08	34,44	18,12	34,53	18,26	34,78	19,08	36,36
8		21,10	40,21	21,13	40,25	21,18	40,36	21,34	40,66	22,27	42,43
9	90	22,17	42,24	22,20	42,29	22,25	42,39	22,41	42,69	23,29	44,37
10		21,10	40,20	21,12	40,24	21,17	40,33	21,30	40,58	22,00	41,92
11		18,05	34,39	18,06	34,42	18,10	34,48	18,19	34,66	18,63	35,50
12		13,49	25,70	13,50	25,72	13,51	25,75	13,56	25,85	13,72	26,15
13	135	8,11	15,46	8,11	15,46	8,12	15,48	8,12	15,49	8,04	15,33
14		2,73	5,22	2,73	5,22	2,73	5,21	2,70	5,16	2,45	4,67
15		-1,82	-3,45	-1,82	-3,46	-1,84	-3,49	-1,89	-3,58	-2,24	-4,25
16		-4,86	-9,25	-4,87	-9,26	-4,89	-9,30	-4,95	-9,42	-5,34	-10,16
17	180	-5,93	-11,28	-5,94	-11,30	-5,96	-11,34	-6,02	-11,46	-6,43	-12,23
18		-4,86	-9,25	-4,87	-9,26	-4,89	-9,30	-4,95	-9,42	-5,34	-10,16
19		-1,82	-3,45	-1,82	-3,46	-1,84	-3,49	-1,89	-3,59	-2,24	-4,25
20		2,74	5,22	2,73	5,22	2,73	5,21	2,70	5,15	2,44	4,67
21	225	8,11	15,46	8,11	15,47	8,12	15,47	8,12	15,48	8,04	15,32
22		13,49	25,70	13,50	25,72	13,51	25,75	13,56	25,85	13,72	26,14
23		18,05	34,39	18,06	34,42	18,10	34,48	18,19	34,66	18,63	35,49
24		21,10	40,20	21,12	40,24	21,17	40,33	21,30	40,58	22,00	41,91
25	270	22,17	42,24	22,20	42,29	22,25	42,39	22,41	42,69	23,29	44,37
26		21,10	40,21	21,13	40,25	21,18	40,36	21,34	40,66	22,27	42,43
27		18,05	34,40	18,08	34,44	18,12	34,53	18,26	34,79	19,08	36,36
28		13,49	25,70	13,50	25,73	13,53	25,78	13,62	25,96	14,20	27,07
29	315	8,10	15,44	8,10	15,44	8,11	15,46	8,14	15,52	8,38	15,98
30		2,71	5,17	2,70	5,16	2,69	5,13	2,65	5,07	2,52	4,82
31		-1,86	-3,54	-1,88	-3,57	-1,92	-3,63	-2,00	-3,80	-2,47	-4,69
32		-4,92	-9,36	-4,94	-9,40	-4,99	-9,49	-5,12	-9,74	-5,82	-11,06

Tabla 15: Valores de las tensiones de los modelos 2.1 - 2.10

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

- **Modelo 3:** Barandilla de 1200mm de alto por 2000mm de ancho, con un perno en cada esquina inferior a una distancia de 200mm de sus lados más próximos. El modelo 3.1 está sometido a una carga lineal de 0,8N/mm en el borde superior y el modelo 3.2 a 1,6N/mm. Las casillas rojas y azul marino indican las tensiones más altas de cada modelo.

Numeración	Grados	Tensión (N/mm)			
		3.1 lado interior	3.1 lado exterior	3.2 lado interior	3.2 lado exterior
1	0	41,62	-35,13	82,96	-70,04
2		42,15	-33,59	83,96	-67,11
3		41,19	-30,93	81,98	-61,91
4		38,79	-27,24	77,08	-54,62
5	45	35,01	-22,67	69,43	-45,52
6		30,02	-17,37	59,34	-34,97
7		24,03	-11,56	47,25	-23,36
8		17,27	-5,46	33,66	-11,14
9	90	10,03	0,70	19,14	1,20
10		2,60	6,67	4,26	13,17
11		-4,73	12,22	-10,37	24,31
12		-11,69	17,13	-24,20	34,17
13	135	-18,00	21,21	-36,71	42,37
14		-23,44	24,31	-47,45	48,59
15		-27,81	26,30	-56,02	52,61
16		-30,95	27,12	-62,13	54,28
17	180	-32,75	26,73	-65,55	53,56
18		-33,15	25,17	-66,17	50,47
19		-32,14	22,48	-63,99	45,17
20		-29,74	18,79	-59,08	37,85
21	225	-26,07	14,22	-51,63	28,81
22		-21,23	8,95	-41,92	18,38
23		-15,43	3,18	-30,31	6,94
24		-8,87	-2,87	-17,23	-5,07
25	270	-1,80	-8,98	-3,17	-17,22
26		5,51	-14,92	11,35	-29,04
27		12,79	-20,45	25,79	-40,09
28		19,77	-25,37	39,62	-49,94
29	315	26,17	-29,46	52,31	-58,19
30		31,75	-32,59	63,40	-64,54
31		36,30	-34,62	72,43	-68,72
32		39,64	-35,47	79,05	-70,58

Tabla 16: Valores de las tensiones de los modelos 3.1 y 3.2

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

- Modelo 4:** Barandilla de 1200mm de alto por 2000mm de ancho, con dos pernos en cada esquina inferior, estando los dos pernos inferiores a una distancia de 200mm de sus lados más próximos y disponiéndose los dos superiores en el mismo eje vertical, salvando 250mm entre los centros de los pernos. El modelo 4.1 está sometido a una carga lineal de 0,8N/mm en el borde superior y el modelo 4.2 a 1,6N/mm.

Numeración	Grados	Modelo 4.1 (N/mm)				Modelo 4.2 (N/mm)			
		Superior Int.	Superior Ext.	Inf. Int.	Inf. Ext.	Superior Int.	Superior Ext.	Inf. Int.	Inf. Ext.
1	0	17,36	-16,65	-3,08	2,92	38,25	-33,09	-6,46	5,86
2		15,18	-15,25	-2,97	2,79	34,67	-30,38	-6,20	5,54
3		12,70	-13,56	-2,86	2,67	30,33	-27,08	-5,93	5,24
4		10,03	-11,64	-2,75	2,56	25,43	-23,31	-5,66	4,99
5	45	7,28	-9,55	-2,63	2,48	20,15	-19,20	-5,37	4,79
6		4,55	-7,39	-2,52	2,42	14,70	-14,93	-5,07	4,67
7		1,94	-5,22	-2,42	2,39	9,29	-10,62	-4,79	4,62
8		-0,43	-3,12	-2,34	2,39	4,12	-6,46	-4,53	4,64
9	90	-2,49	-1,18	-2,28	2,42	-0,60	-2,59	-4,32	4,72
10		-4,15	0,53	-2,26	2,48	-4,70	0,84	-4,18	4,87
11		-5,35	1,95	-2,28	2,55	-8,01	3,68	-4,13	5,05
12		-6,05	3,01	-2,35	2,65	-10,43	5,83	-4,19	5,26
13	135	-6,23	3,67	-2,46	2,76	-11,86	7,19	-4,35	5,50
14		-5,88	3,90	-2,61	2,87	-12,26	7,70	-4,63	5,73
15		-5,04	3,70	-2,78	2,98	-11,64	7,34	-5,00	5,96
16		-3,73	3,06	-2,98	3,08	-10,01	6,13	-5,44	6,17
17	180	-2,01	2,01	-3,18	3,18	-7,47	4,12	-5,93	6,36
18		0,06	0,61	-3,38	3,26	-4,09	1,38	-6,43	6,52
19		2,41	-1,11	-3,57	3,32	0,00	-1,96	-6,92	6,67
20		4,96	-3,06	-3,73	3,38	4,66	-5,77	-7,37	6,79
21	225	7,62	-5,17	-3,86	3,42	9,72	-9,91	-7,75	6,91
22		10,30	-7,36	-3,95	3,47	15,02	-14,22	-8,05	7,03
23		12,90	-9,56	-4,01	3,50	20,36	-18,54	-8,26	7,14
24		15,31	-11,67	-4,02	3,53	25,55	-22,71	-8,36	7,23
25	270	17,45	-13,61	-3,98	3,54	30,38	-26,57	-8,35	7,30
26		19,22	-15,32	-3,91	3,53	34,67	-29,97	-8,26	7,32
27		20,55	-16,72	-3,81	3,51	38,23	-32,79	-8,08	7,29
28		21,37	-17,76	-3,69	3,45	40,90	-34,90	-7,84	7,19
29	315	21,64	-18,39	-3,57	3,38	42,56	-36,23	-7,57	7,02
30		21,36	-18,59	-3,44	3,28	43,13	-36,71	-7,28	6,78
31		20,52	-18,36	-3,31	3,17	42,57	-36,33	-7,00	6,50
32		19,17	-17,70	-3,20	3,05	40,92	-35,10	-6,72	6,19

Tabla 17: Valores de las tensiones de los modelos 4.1 y 4.2 para los pernos superior interior, superior exterior, inferior interior e inferior exterior.

Análisis tensional de paneles de vidrio en torno al anclaje puntual

Máster en Innovaciones Tecnológicas en la Edificación

Jonathan Fernández Navarrete

- **Modelo 5:** Panel cuadrado para fachada de 1400mm por 1400mm, con cuatro pernos, uno a cada esquina, colocados a una distancia de 200mm, 150mm y 100mm en los modelos 5.1, 5.2 y 5.3 respectivamente. Todos los modelos están sometidos a la misma carga de viento de 1000N/m^2 ($0,001\text{N/mm}^2$), en toda la superficie del panel.

Numeración	Grados	Tensión (N/mm2)					
		5.1 lado interior	5.1 lado exterior	5.2 lado interior	5.2 lado exterior	5.3 lado interior	5.3 lado exterior
1	0	-2,84	2,48	-3,55	3,05	-4,24	3,63
2		-3,13	2,20	-3,95	2,66	-4,75	3,13
3		-3,34	1,87	-4,25	2,21	-5,13	2,57
4		-3,47	1,53	-4,44	1,72	-5,36	1,97
5	45	-3,52	1,17	-4,50	1,22	-5,44	1,36
6		-3,47	0,81	-4,44	0,72	-5,36	0,74
7		-3,34	0,46	-4,25	0,24	-5,12	0,14
8		-3,13	0,14	-3,96	-0,20	-4,75	-0,41
9	90	-2,84	-0,13	-3,56	-0,60	-4,24	-0,90
10		-2,50	-0,36	-3,07	-0,92	-3,64	-1,31
11		-2,10	-0,54	-2,52	-1,16	-2,95	-1,61
12		-1,67	-0,64	-1,92	-1,31	-2,22	-1,80
13	135	-1,23	-0,68	-1,30	-1,36	-1,45	-1,86
14		-0,78	-0,64	-0,68	-1,31	-0,69	-1,80
15		-0,35	-0,53	-0,08	-1,16	0,05	-1,61
16		0,05	-0,36	0,47	-0,92	0,73	-1,31
17	180	0,40	-0,13	0,96	-0,59	1,33	-0,90
18		0,68	0,15	1,36	-0,20	1,83	-0,41
19		0,90	0,46	1,66	0,24	2,20	0,14
20		1,03	0,81	1,84	0,72	2,43	0,74
21	225	1,07	1,17	1,90	1,23	2,51	1,36
22		1,03	1,53	1,84	1,73	2,43	1,97
23		0,90	1,88	1,66	2,21	2,20	2,57
24		0,68	2,20	1,36	2,66	1,83	3,13
25	270	0,40	2,48	0,96	3,06	1,33	3,63
26		0,05	2,71	0,47	3,38	0,73	4,04
27		-0,35	2,88	-0,08	3,63	0,05	4,35
28		-0,78	2,99	-0,68	3,78	-0,69	4,55
29	315	-1,22	3,03	-1,30	3,83	-1,45	4,61
30		-1,67	2,99	-1,92	3,78	-2,22	4,55
31		-2,10	2,88	-2,52	3,63	-2,95	4,35
32		-2,50	2,71	-3,07	3,38	-3,64	4,04

Tabla 18: Valores de las tensiones de los modelos 5.1, 5.2 y 5.3